

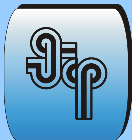
Научная сессия общего собрания СО РАН
«Углеродная нейтральность –
современные вызовы»
Малый зал Дома ученых СО РАН
3 декабря 2021 г.
г. Новосибирск

Изменение климата, возможные механизмы и энергетика

С.В. Алексеенко,
академик РАН,
председатель Объединенного ученого совета СО РАН по энергетике, машиностроению, механике и процессам управления,
научный руководитель Института теплофизики СО РАН

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM



Фундаментальная роль энергетики

ЭНЕРГЕТИКА – базис экономики любой страны вне зависимости от технологического уклада. Однако сегодня в обществе возникла беспрецедентная ситуация, когда необходимо безотлагательно принимать принципиальные решения по дальнейшему развитию мировой энергетики.

21-я Всемирная конференция по климату (Париж, 2015)

- **Принимали участие лидеры 195 стран мира.**
- **186 стран до конференции представили добровольные обязательства по сокращению эмиссии парниковых газов.**
- **Подписано Соглашение, конечной целью которого является не допустить повышения температуры на 2°C до конца XXI столетия.**
- **Россия ратифицировала соглашение 23.09.2019 г. с обязательствами к 2030 г. не более 70% выбросов парниковых газов от уровня 1990 г.**
- **Рост температуры связывается с глобальным потеплением, основной причиной которого считаются выбросы парниковых газов – прежде всего, CO_2.**
- **Полагается, что антропогенная эмиссия CO_2 играет ключевую роль, а главным виновником антропогенных выбросов объявлена энергетика на органическом топливе.**
- **При выполнении требований Парижского соглашения структура мировой энергетики в ближайшие десятилетия должна претерпеть радикальные изменения в результате вытеснения угля и замещения его газом и безуглеродными источниками.**



Сомнения в положениях Парижского соглашения и альтернативные взгляды

(1) «Не существует убедительных научных свидетельств того, что антропогенный выброс CO_2 или других парниковых газов могут в обозримом будущем вызвать катастрофическое разрушение климата Земли».
Из петиции правительству США, которую в 1997 году подписали более 15 тысяч американских ученых.

(2) В 2004 году аналогичное заключение официально объявила РАН.

(3) Существуют прямые свидетельства того, что изменения содержания CO_2 в атмосфере являются следствием изменения температуры, а не его причиной.

(4) Колебания температур на Земле совершенно определенно связаны с колебаниями солнечной активности!

(5) В будущем (через 50 – 70 лет) ожидается глобальное похолодание на Земле (400-летний период между великими минимумами – последний был в 1635 – 1715 гг.).

(6) Колебания температур на Земле связаны с прецессией оси Земли и изменениями параметров орбиты.

(7) Антропогенный вклад в эмиссию CO_2 пренебрежимо мал (4%), все определяется природными выбросами.

(8) Вклад CO_2 в рост температуры Земли за счет парникового эффекта мал (20%), и не играет большой роли.

(9) Основной вклад в парниковый эффект дают пары воды (70%), а они не учитываются в моделях МГЭИК.

(10) Океан может поглотить все избытки CO_2, поскольку в нем в 80 раз больше CO_2, чем в атмосфере.

(11) Климатические модели Земли в силу неимоверной сложности не могут адекватно учесть все факторы.

(12) Рост температуры Земли немонотонный, а концентрации CO_2 – монотонный, т.е. нет корреляции.

(13) В РФ уже есть баланс между антропогенными выбросами CO_2 и их поглощением лесами.

(14) Нельзя измерить температуру Земли с такой точностью, чтобы утверждать о глобальном потеплении.

(15) В геологическом плане период наблюдения (десятки лет) слишком мал для глобальных выводов.

(16) Глобальное потепление – политический заказ, как и озоновые дыры в недалеком прошлом.

Критерии достоверности моделирования

При моделировании **сложных** систем по объективным причинам (недостаточная точность измерений; слишком малый период наблюдений; стохастичность процессов) на практике невозможно достоверно подтвердить результаты моделирования. Тогда приемлемым допускается метод **бенчмаркинга,** который представляет собой сопоставительный анализ на основе эталонных показателей.
В научных исследованиях можно выделить 2 этапа. **1 этап** – сравнение моделей на основе решения тестовых (эталонных) задач и последующее определение наилучших моделей. **2 этап** – решение поставленных сложных задач с использованием разных моделей и отбор наиболее достоверных результатов с учетом иерархии моделей по качеству.

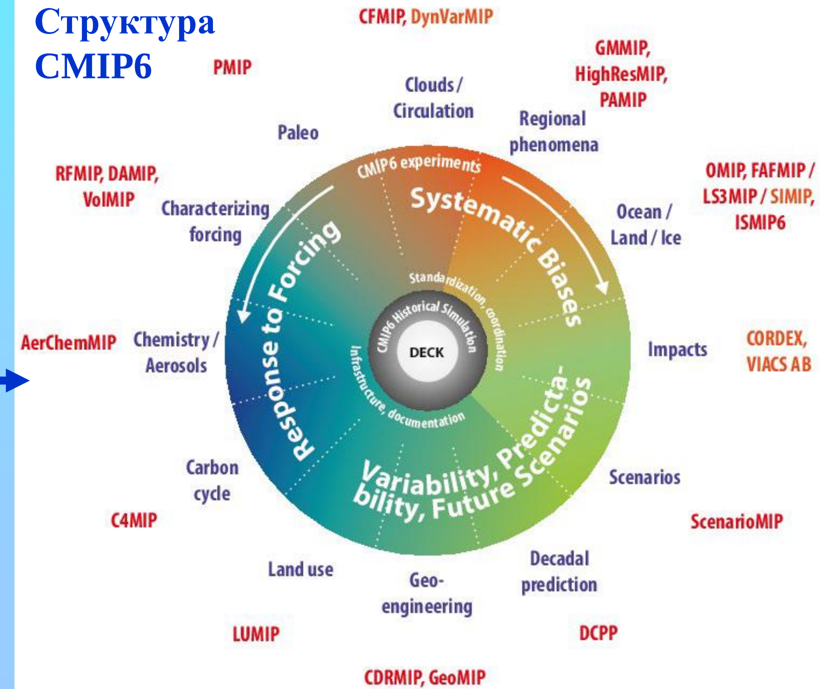
В **МГЭИК** приняты 5 уровней **достоверности** и **вероятностные** показатели.

Модели МГЭИК:

МГЭИК (IPCC) - Межправительственная группа экспертов по изменению климата. Является ведущим международным органом по оценке изменения климата. Учреждена Программой ООН и Всемирной метеорологической организацией в 1988 г.
CMIP6 (6th phase of the Coupled Model Intercomparison Project – 6-ая фаза Проекта по взаимному сопоставлению сопряженных моделей).

В **России 4** модели:
1. **МЭИ** - (генетическая модель, *чл.-к. В.В. Клименко*).
2. **Главная геофизич. обсерватория** им. А. И. Воейкова.
3. **ИВМ** им. Г.И. Марчука РАН.
4. **ИФА** им. А.М. Обухова РАН (*ак. И.И. Мохов*).

Структура CMIP6

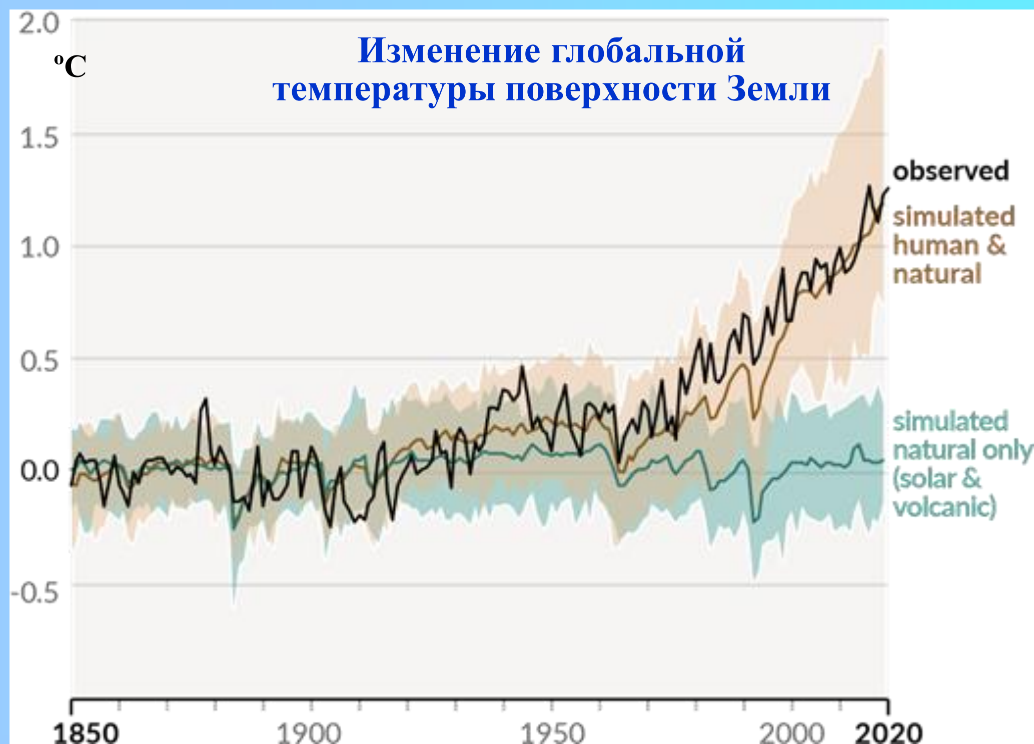


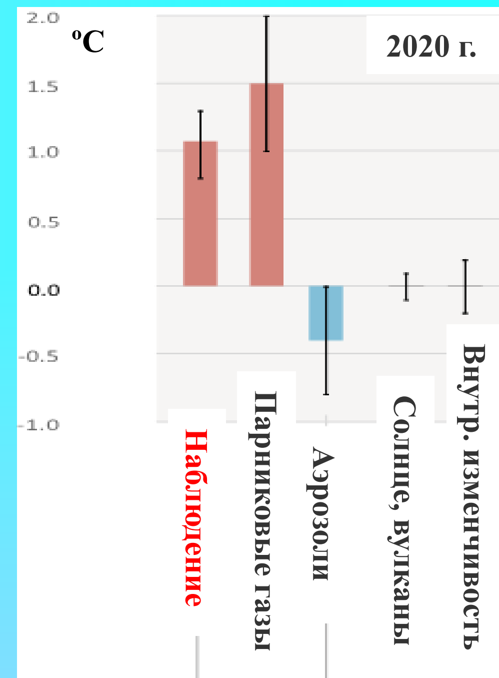


МГЭИК (IPCC)

В организационную структуру **МГЭИК** в настоящее время входят три рабочие группы и одна целевая группа. **Рабочая группа I** занимается **физическими** основами науки об изменении климата, **Рабочая группа II** — последствиями изменения климата, адаптацией и уязвимостью, а **Рабочая группа III** — смягчением воздействий изменения климата.

В **августе 2021** г. вышел Доклад Рабочей группы **I**, как часть 6 оценочного доклада, объемом **4 тыс. стр**.

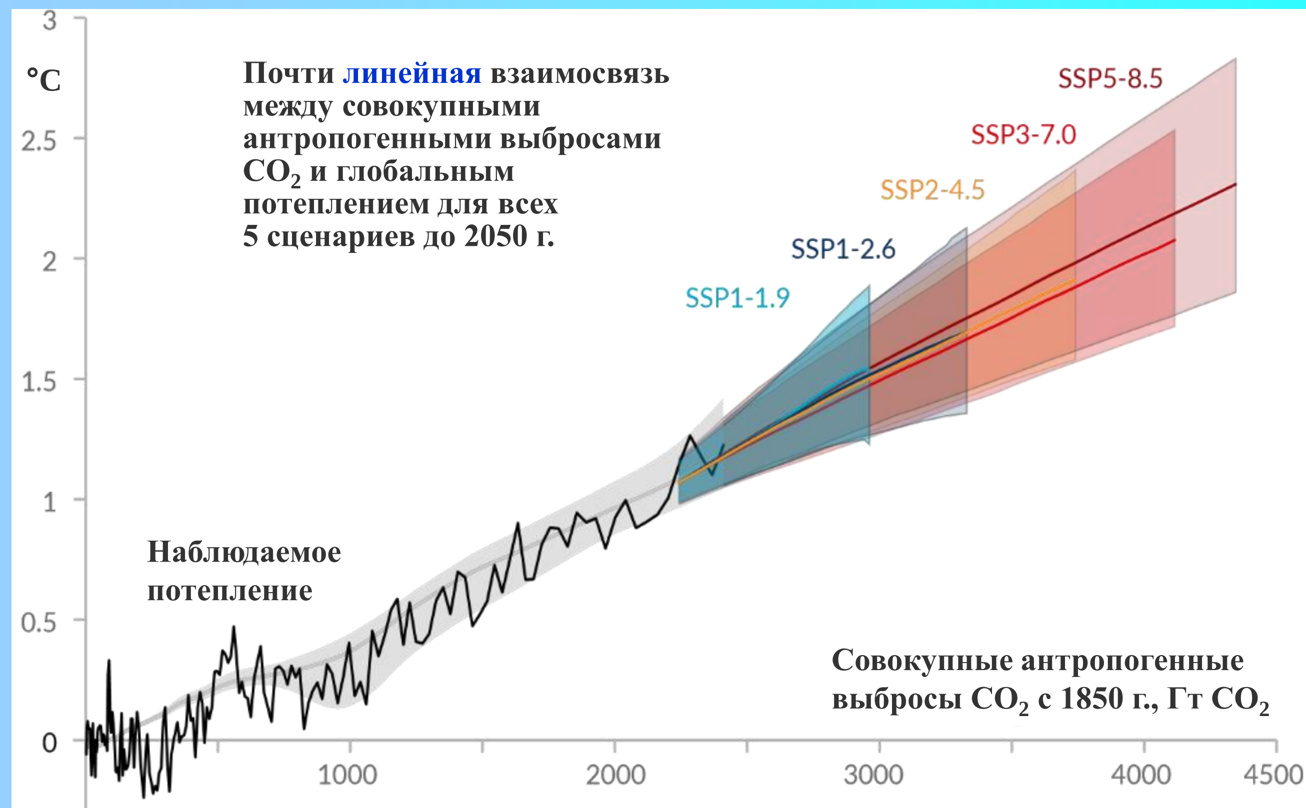




Изменения температуры, связанные с **парниковыми** газами, **аэрозолями**, озоном и изменениями в землепользовании (коэффициент отражения в землепользовании), **солнечными** и **вулканическими** факторами и **внутренней изменчивостью** климата.



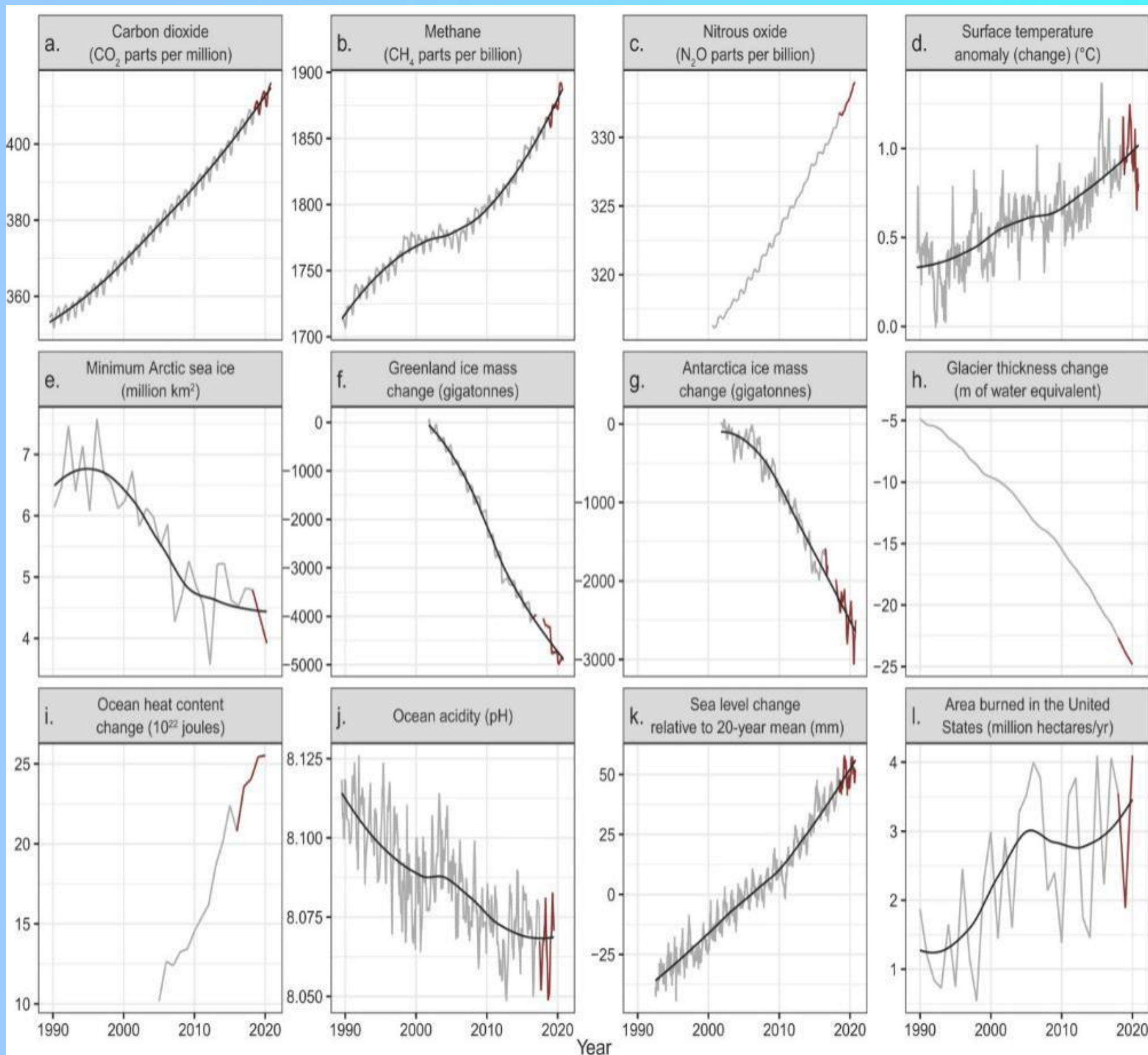
Повышение глобальной температуры к 2050 г. в зависимости от совокупных выбросов CO_2



Существует почти линейная взаимосвязь между совокупными антропогенными выбросами CO_2 и глобальным потеплением, которое они вызывают. По оценкам, каждые 1 000 Гт CO_2 совокупных выбросов CO_2 могут привести к повышению глобальной температуры поверхности на 0,45°С.
Это количество называется переходной климатической реакцией на совокупные выбросы CO_2 (TCRE).
Такая взаимосвязь подразумевает, что достижение чистого нуля антропогенных выбросов CO_2 является необходимым условием для стабилизации вызванного человеком повышения глобальной температуры.



“World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2021”. Предупреждение ученых мира о климате. Чрезвычайная ситуация 2021.



«Мы подтверждаем декларацию о чрезвычайной ситуации в области климата и призываем к преобразовательным мерам, которые сейчас необходимы больше, чем когда-либо, для защиты жизни на Земле».

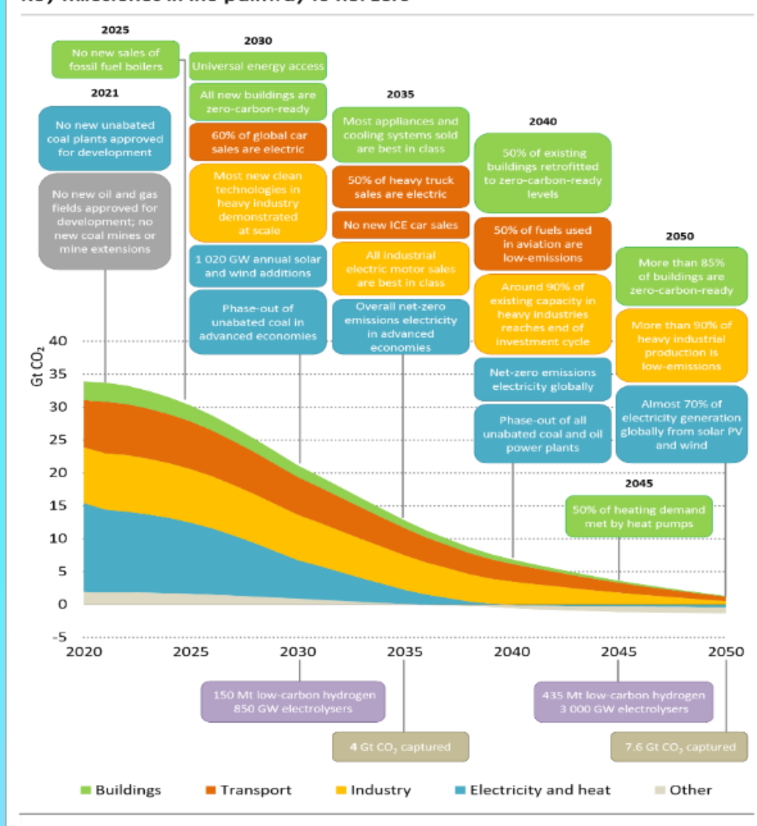
The World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2021 (*Ripple et al. 2020*). Эта статья имеет более 13 900 подписей (158 стран). Чтобы подписаться, посетите Alliance of World Scientists website: https://scientistswarning. forestry. oregonstate.edu.

Ripple et al. // BioScience, 2021. https://academic.oup.com/bioscience

97% климатологов признают данную ситуацию с климатом. Национальная Академия США и Американское физическое общество – среди сторонников.

«Net Zero by 2050»
A Roadmap for the Global Energy Sector

Дорожная карта для глобальной энергетической системы - одно из самых важных и сложных начинаний в истории МЭА (IEA -International Energy Agency). Лидеры G7 признают дорожную карту МЭА "Чистый ноль к 2050 году« (июнь 2021).



Энергетический сектор дает 3/4 выбросов парниковых газов (но доля «большой» энергетики - 40%).

К 2021 году не будет вложений в разработку новых угольных станций и месторождений нефти и газа.

К 2024 году не будет новых продаж котлов на органическом топливе.

К 2030 году страны G7 приняли решение отказаться от угля в качестве топлива.

К 2030 году доля электромобилей в мировых продажах автомобилей вырастет с 5% до более чем 60%.

К 2035 году продаж новых легковых автомобилей внутреннего сгорания не будет.

К 2040 году мировая электроэнергетика уже достигнет нулевого объема выбросов.

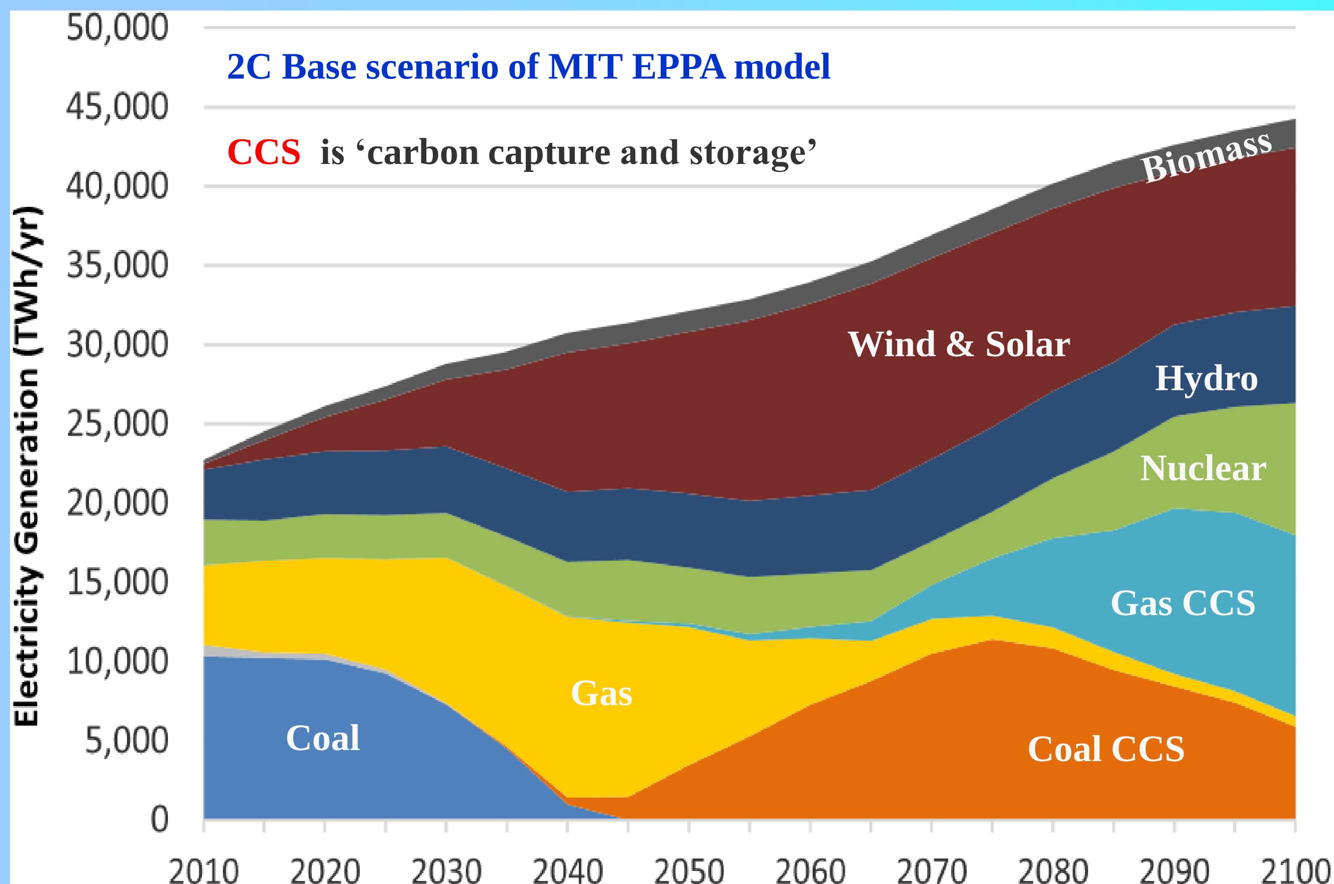
К 2050 году почти 90% производства электроэнергии будет производиться из возобновляемых источников, при этом на долю ветра и солнечной энергии вместе приходится почти 70%.

Оставшаяся часть будет приходиться в основном на ядерную энергетику.



Сценарий MIT

Morris et al. // Climate Change Economics, 2021



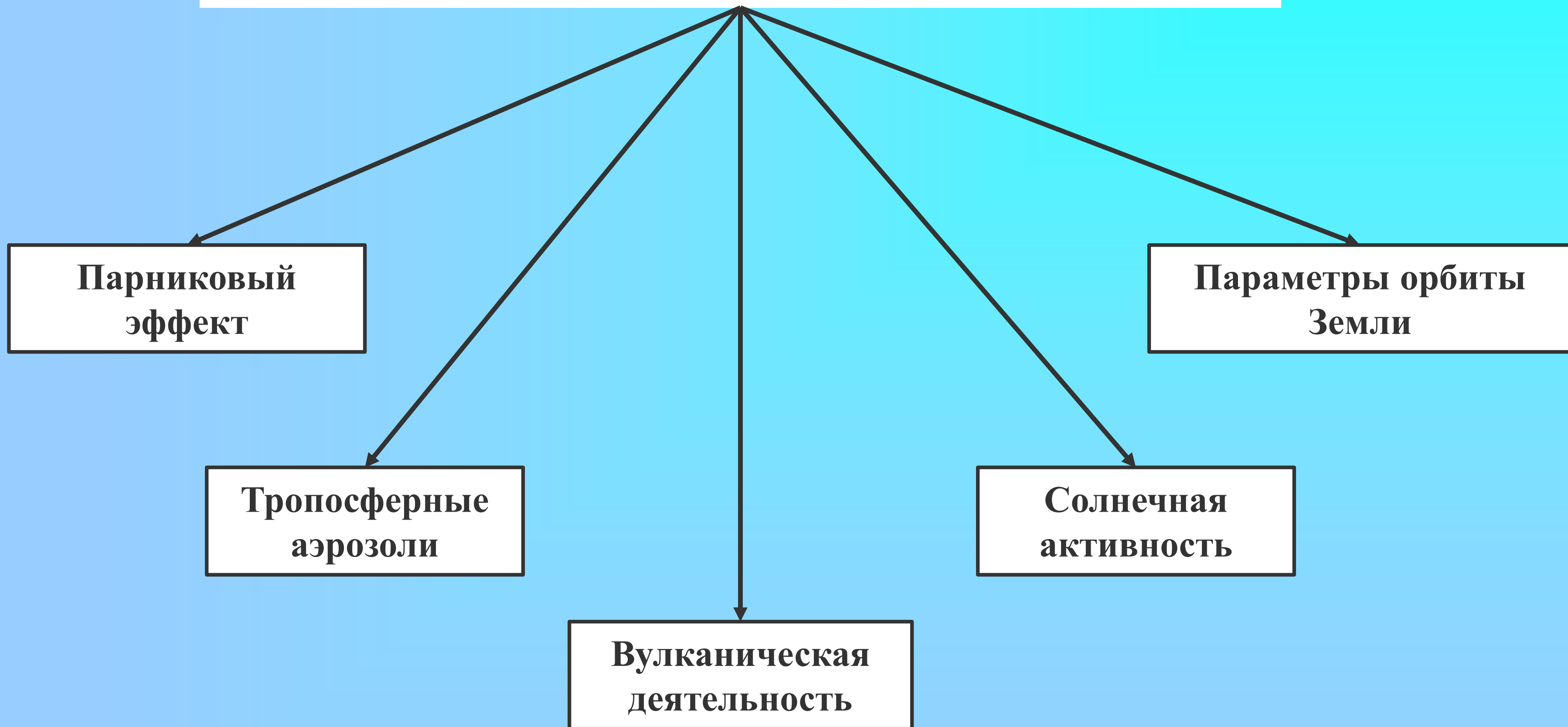
EPPA - это вычислимая общая равновесная многорегиональная, многосекторная рекурсивно-динамическая модель **мировой экономики**. Сценарий **2C** означает стабилизацию средней температуры атмосферы на **2°C** выше уровня доиндустриальных лет с вероятностью 66%.

2C Base scenario приводит к совершенно иному сочетанию электроэнергии, чем в **Reference scenario**, а также к меньшему общему производству (примерно на **30%** меньше в 2100 году). К 2100 году на **CCS** приходится почти **40%** мирового производства электроэнергии. Конечная глобальная генерация в 2100 году составит около **13% coal CCS**, **26% gas CCS**, 19% nuclear, 14% hydro, 23% wind and solar, 4% biomass и менее 2% natural gas.

Типичное **увеличение** затрат на электроэнергию для **угольных** электростанций составляет **60%** при снижении выбросов CO_2 на 95%. Для **газовой** электростанции типичное увеличение составляет **40%** при сокращении выбросов CO_2 на 90%.



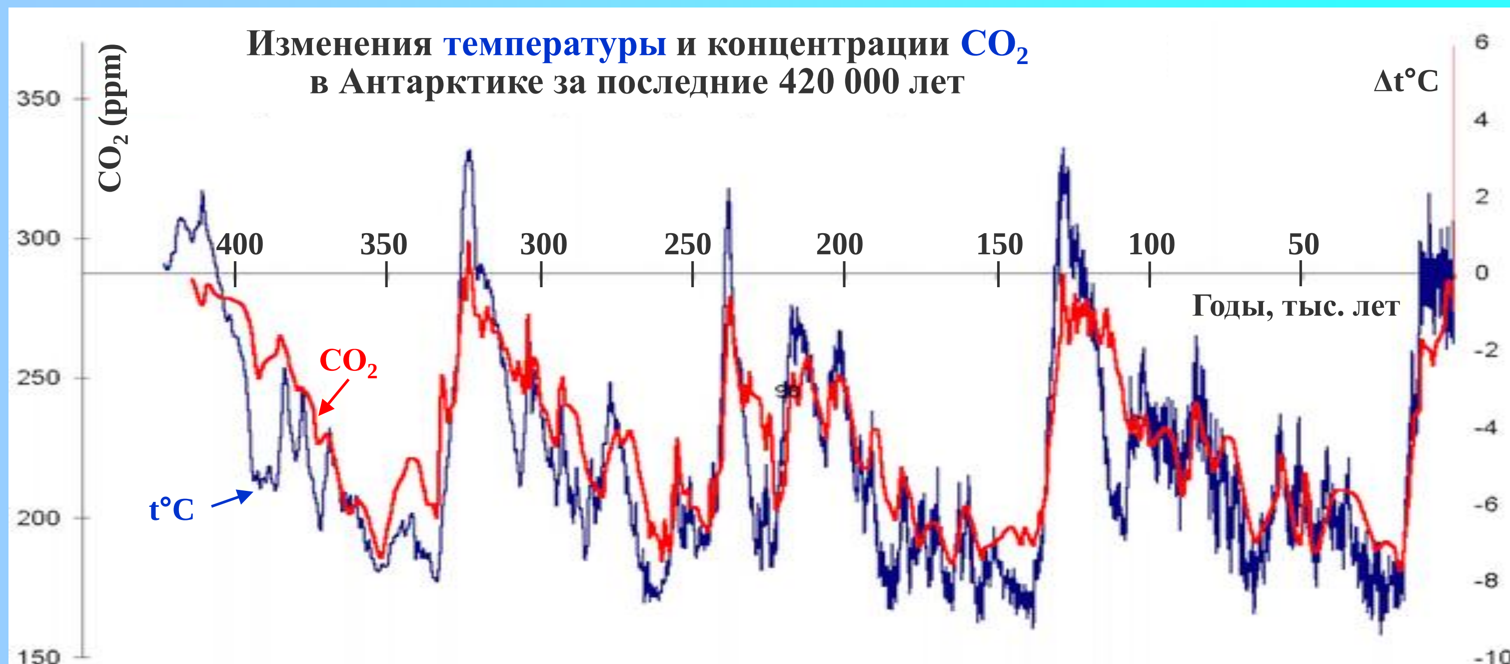
Факторы, влияющие на климат





Влияние параметров орбиты Земли

Petit et al. // Nature, 1999



Циклическое чередование ледниковых и межледниковых периодов объясняется изменениями в **орбите** движения Земли относительно Солнца (**циклы Миланковича**). Выделяют **3** основных цикла.

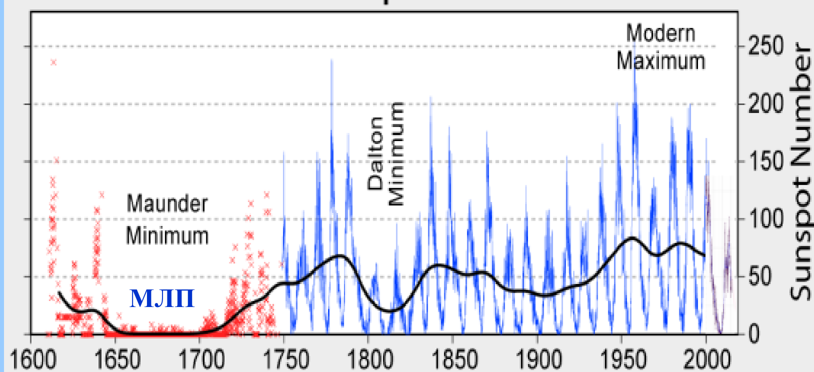
1. Долгопериодические колебания эксцентриситета орбиты Земли с периодом около **96 000 лет**.
2. Долгопериодические колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты с периодом **41 000** лет.
3. Поворот земной оси так, что ось описывает конус (46°) с периодом **23 000 лет** (прецессия).

Суммарно эти циклы приводят к **периодичности** в потоке **солнечной радиации** на Землю.

Поскольку циклы некратные, то наблюдается не совсем регулярный отклик по температуре.

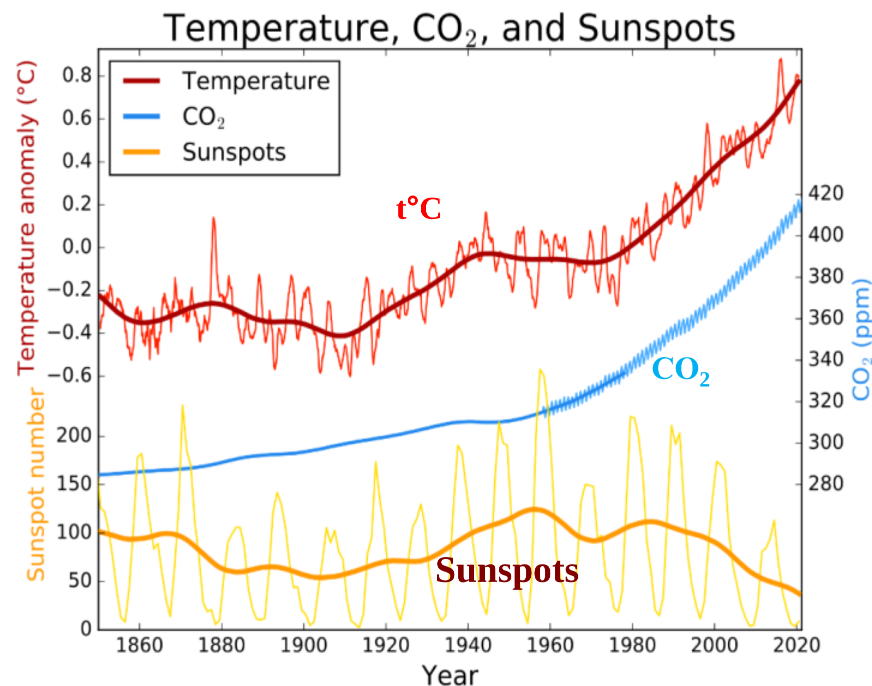
Резюме: **Циклы Миланковича не влияют на наблюдаемое глобальное потепление.**

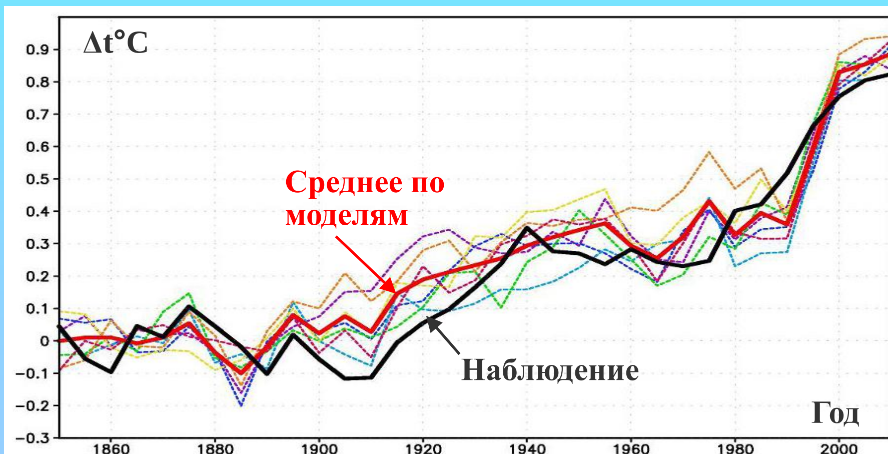
Влияние солнечной активности



Основные циклы солнечной активности: 11, 22 и 2300 лет. Снижение солнечной активности (числа пятен или числа Вольфа) привело к наступлению малого ледникового периода (МЛП) в 17 – 18 веках. А вот рост солнечной активности между 1900 и 1950 гг. привел к некоторым потеплениям. С 2004 г. наблюдается Современный Минимум солнечной активности.

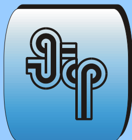
Полное количество солнечной радиации, получаемой на верхней границе земной атмосферы, составляет в среднем 1 361 Вт/м². Светимость Солнца изменяется на 1,3 Вт/м² или на 0,1 % в пределах 11-летних циклов. *Вывод*: 11-летний цикл не влияет на изменения климата.





Сравнение наблюдаемого изменения температуры (черный цвет) с моделями (цветные линии).

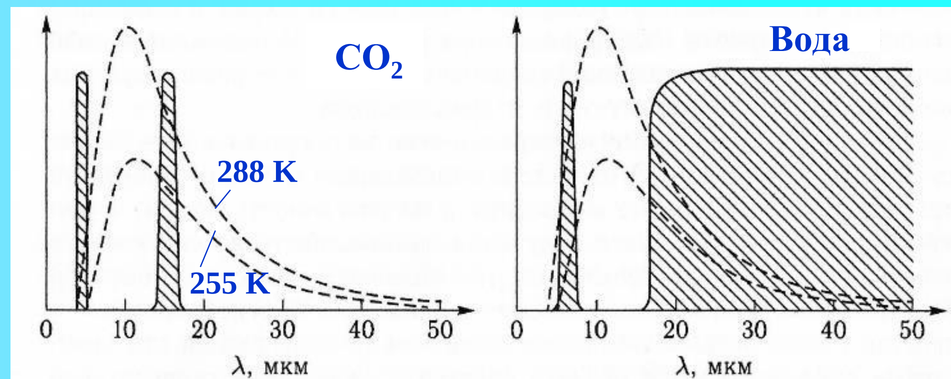
Volodin, Gritsun // Earth Syst. Dynam., 2018



Парниковый эффект

Парниковый эффект — повышение температуры нижних слоёв атмосферы за счет ее различной прозрачности в **видимом** и дальнем **инфракрасном** диапазонах (*Аррениус, 1896*).
Чувствительность климата – рост температуры нижних слоёв атмосферы при **удвоении** концентрации CO_2.
Оценка **МГЭИК**: **3°С.**

Средняя температура Земли: **14°С.**
Без парникового эффекта: **-19°С.**
Т.е., роль парникового эффекта: **+33°С.**



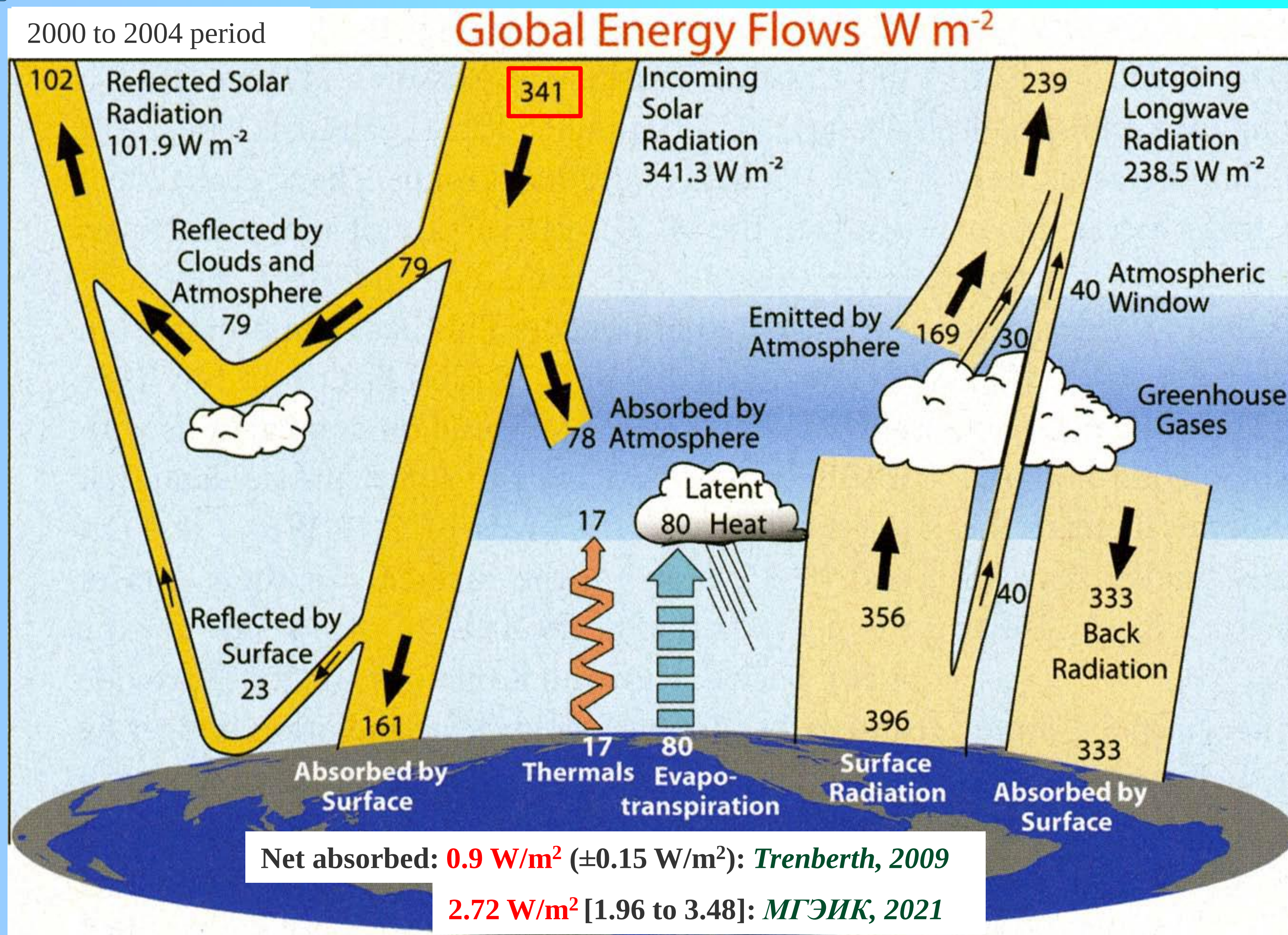
Спектры поглощения CO_2 и **воды**, а также теплового излучения Земли (288 К) и атмосферы (255 К)

Смирнов (2017)

Основные **парниковые газы** атмосферы Земли	
Газ	Вклад
Водяной пар	**36 — 72 %**
Диоксид углерода	**9 — 26 %**
Метан	**4 — 9 %**
Озон	**3 — 7 %**



Баланс энергии на Земле



Trenberth, Fasullo, Kiehl // Bull. American Meteorological Society, 2009

Углеродный цикл

АТМОСФЕРА
средняя скорость роста 4 ГтС/год
Накоплено, ГтС: 589 + (260)

2005 – 2016 гг.

нетто-поток: океан
2.6±0.5
0.7
регионы поглощения CO_2 океаном: 80 = 60 + 20
регионы выделения CO_2 из океана: 78 = 61 + 18

нетто-поток: суша
3.1±0.9
1.7
выделение из водоёмов суши: 1
фотосинтез: 123±8 = 109 + 14
автотрофное и гетеротрофное дыхание: 118 = 106 + 12
природные пожары: 1.4±0.2
вулканизм: 0.1
выветривание минералов: 0.3
землепользование: 1.0±0.5
сжигание ископаемого топлива и производство цемента: 9.3±0.5

ОКЕАН: 175±20
верхний перемешанный слой: 900
морская биота: 1–3
50
37
90
101
11
2
растворённый органический углерод: 700
2
глубокий океан: ~ 37 000
0.2
ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ~1800

реки 0.9

РАСТИТЕЛЬНОСТЬ: (от 450 до 650) – (30±45)

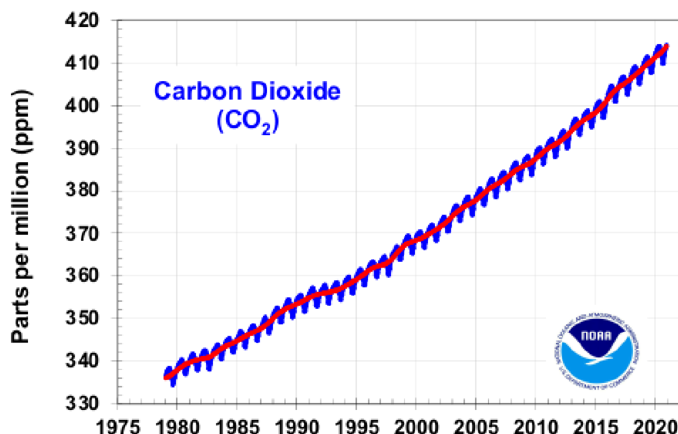
экспорт в водоёмы суши : 1.7
осаждение: 0.2
выветривание минералов: 0.1
ПОЧВА: от 1500 до 2400
ТОРФЯНЫЕ БОЛОТА: от 500 до 700
ИСКОПАЕМОЕ ТОПЛИВО:
газ: от 383 до 1135
нефть: от 173 до 264
уголь: от 446 до 541
-410±20
ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА: 1035±150

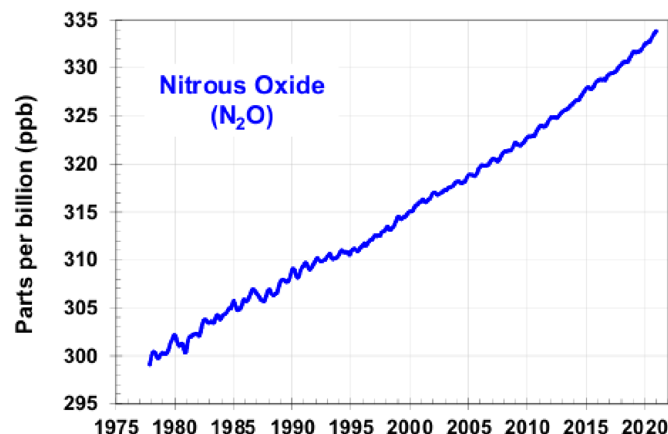
черный текст: доиндустриальное состояние
красный: изменение в индустриальный период

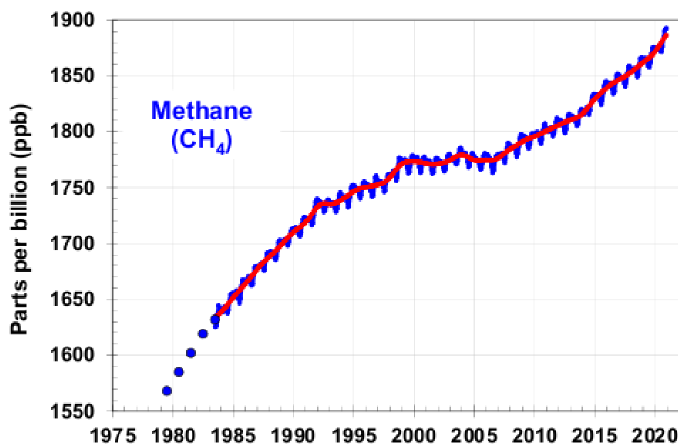
Запасы: ГтС
Потоки: ГтС/год

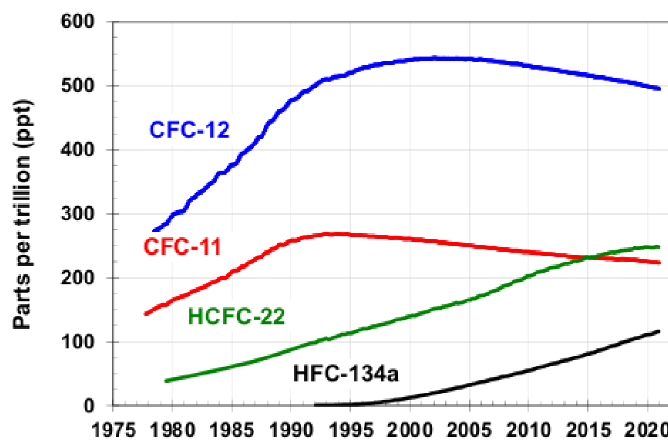


Парниковые газы в атмосфере Земли









Глобальное среднее содержание основных, хорошо смешанных, долгоживущих парниковых газов (NOAA, Global Monitoring Laboratory). NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) — Национальное управление океанических и атмосферных исследований (*https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html*).

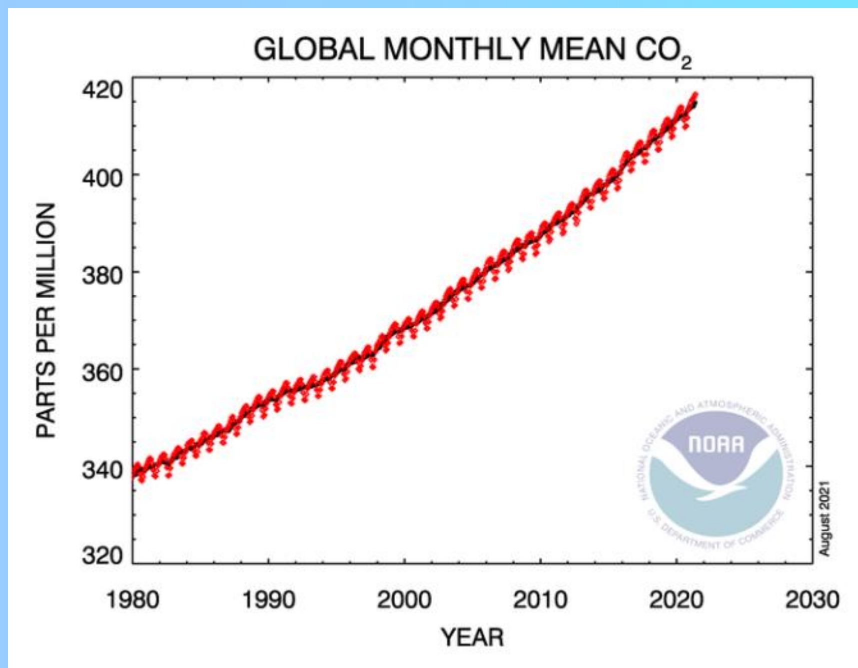
Вклад CO_2 в парниковый эффект примерно в 2 - 3 раза выше других парниковых газов (кроме воды).

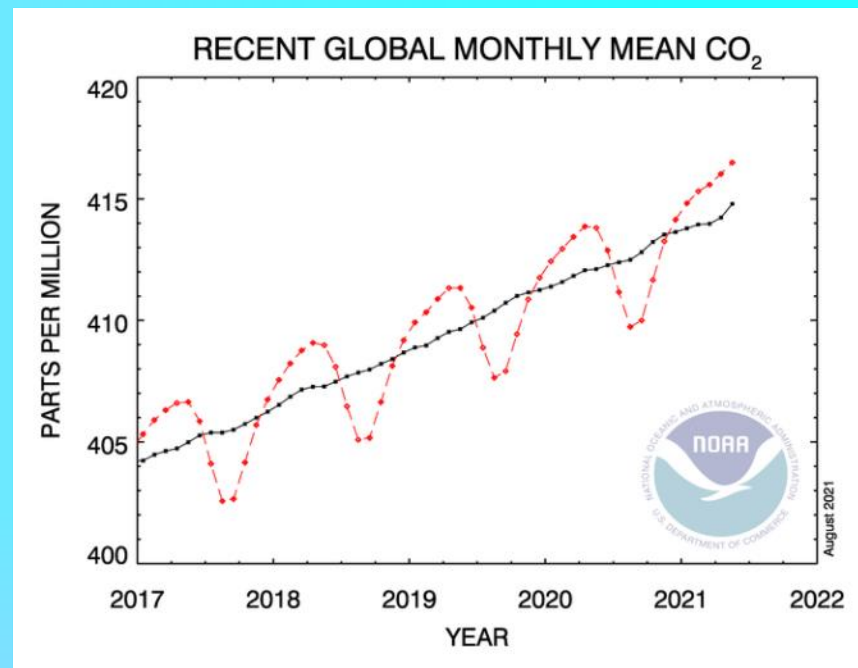
Водяной пар вносит основной вклад в парниковый эффект – до 72%.

Очень сильная зависимость влажности от температуры: exp (- h/T^2), что дает сильную обратную связь.



Среднемесячные значения концентрации CO_2





Графики показывают среднемесячное значение двуокиси углерода в глобальном масштабе, усредненное по участкам морской поверхности. Красные линии и символы представляют среднемесячные значения, центрированные в середине каждого месяца. Черные линии и символы - для среднего сезонного цикла.

Концентрация CO_2 в атмосфере с 1850 г. по настоящее время возросла на 48% в результате сжигания органического топлива в процессе деятельности человека. Столь высокого уровня она не достигала ни разу в последние 420 тыс. лет, а возможно, и в последние 20 млн. лет.

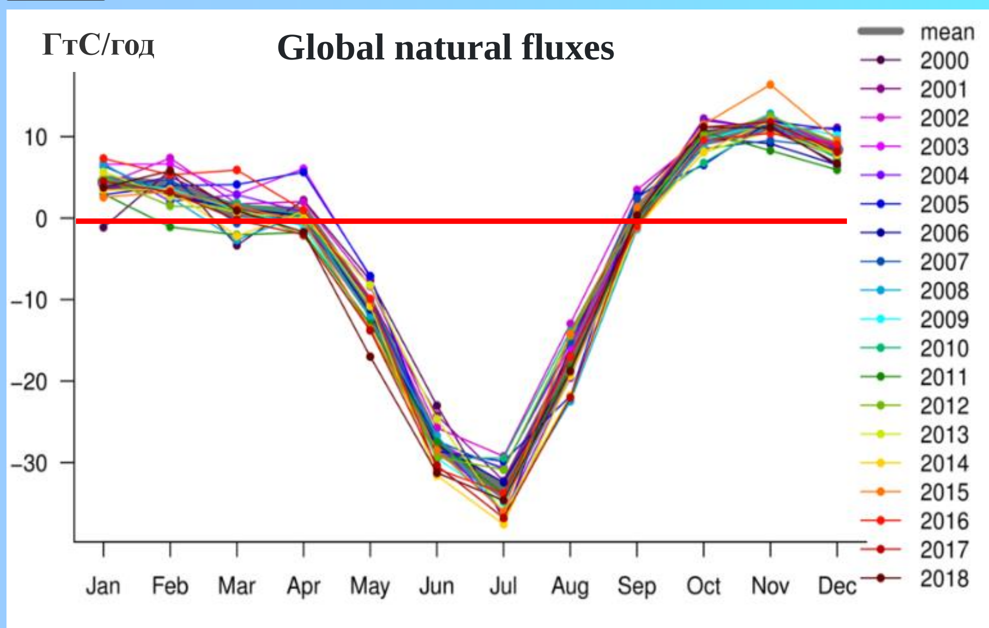
History of atmospheric carbon dioxide from 800,000 years ago until 2019 (анимация): https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/history.html

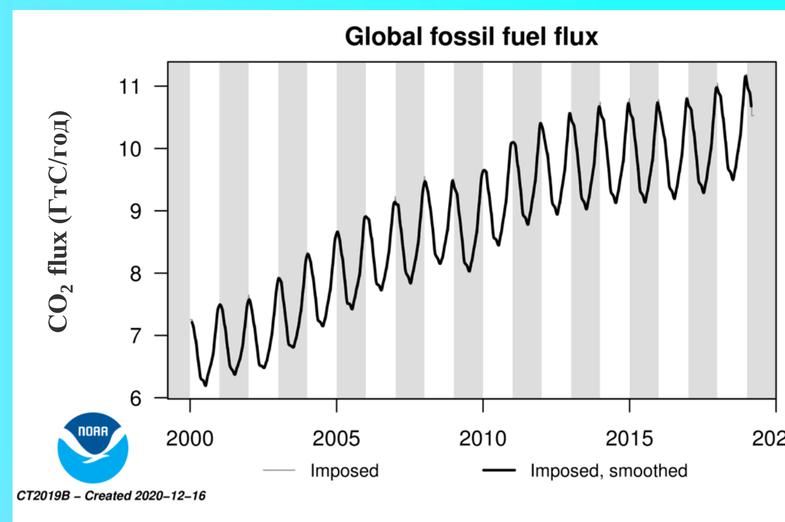
Global Monitoring Laboratory

Conway, 1994; https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/



Среднемесячные значения концентрации CO_2





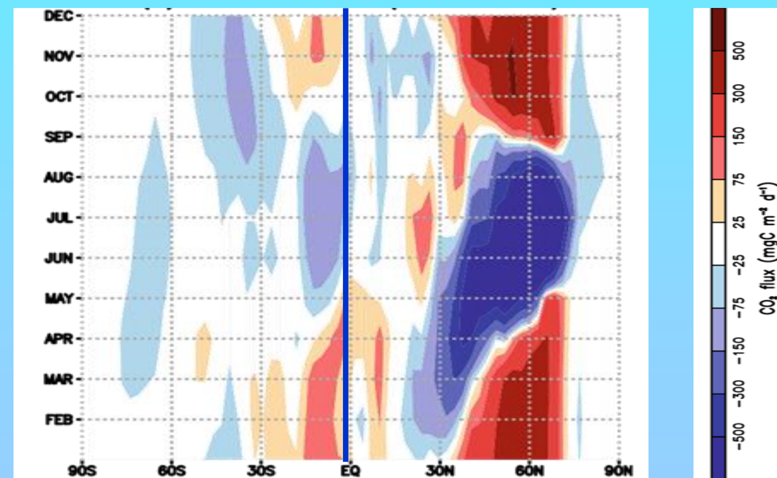
Годовой цикл оптимизированных natural fluxes, рассчитанных по месяцам и нанесенных для каждого года. «Natural flux» - это сумма выбросов CO_2 в атмосферу из наземной биосферы, пожаров и морской поверхности. Он не включает выбросы ископаемого топлива.

Годичные колебания потоков:

natural fluxes = 40 ГтС/год

fossil fuel emissions = 1,5 ГтС/год (менее 4% от natural).

Колебания несут сезонный характер (фотосинтез).

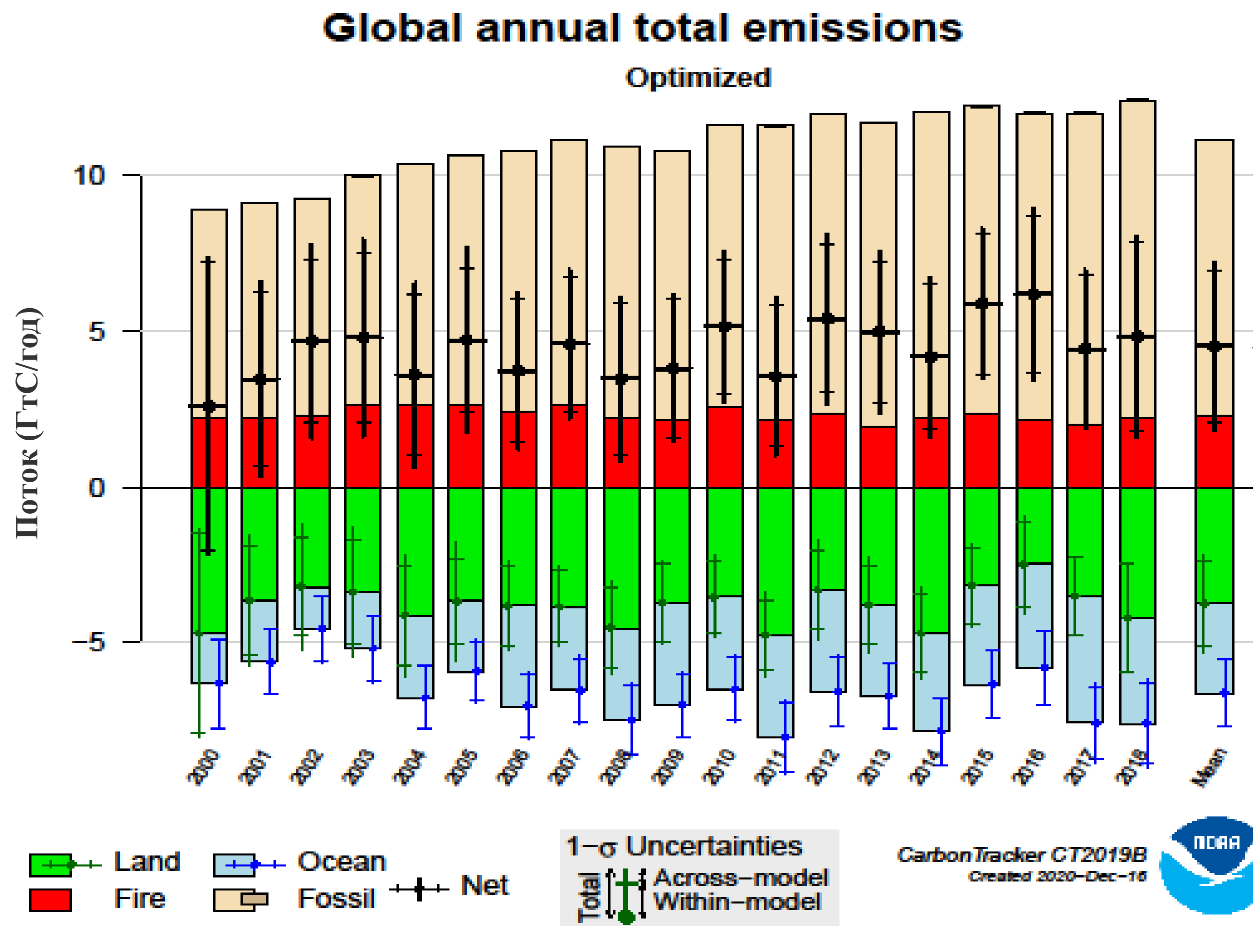


Локальные потоки CO_2 в зависимости от широты и дня в году (mgC m^{-2} d^{-1}). Модель MROC-ES2LF (2000 – 2009). ***Patra et al. // Progress Earth and Planetary Science (2021)*.**

https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html



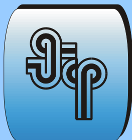
Баланс потоков CO_2 на Земле



Дисбаланс
+4 млрд. т С/год!

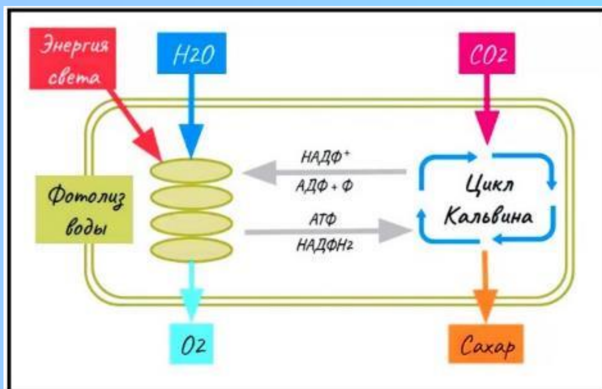
Столбики на этом рисунке представляют выбросы CO_2 за каждый год в млрд. т С / год по всему миру. Показаны разным цветом: выбросы ископаемого топлива (коричневый), поток земной биосферы, исключая пожары (зеленый), прямые выбросы от пожаров (красный) и газообмен воздух-море (синий). Отрицательные выбросы указывают на то, что поток удаляет CO_2 из атмосферы. Чистый поверхностный обмен, показан толстой черной линией. Видно, что дисбаланс в последние годы: +4 млрд. т С / год!

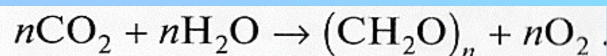
https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html

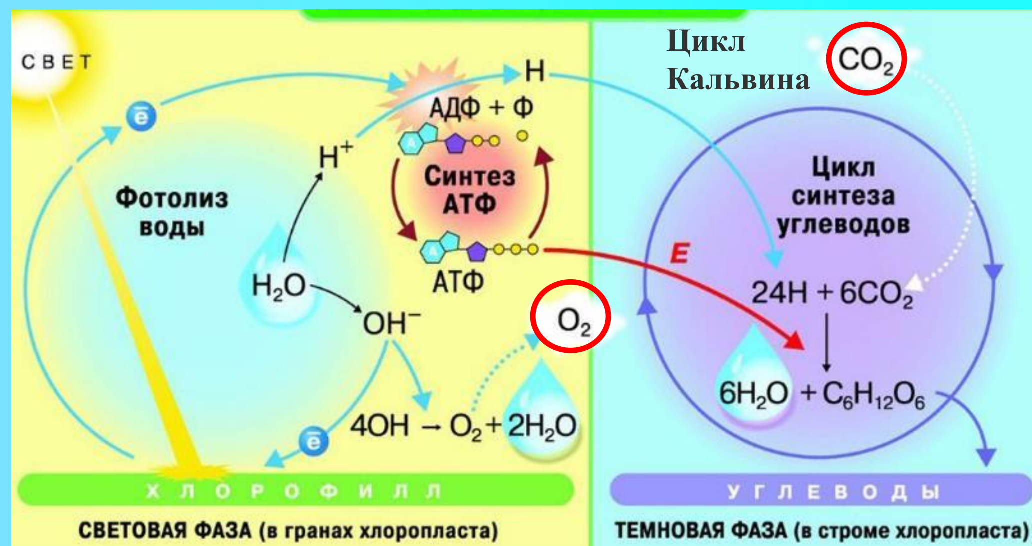


Фотосинтез (суша)

Упрощенная схема фотосинтеза




$$nCO_2 + nH_2O \rightarrow (CH_2O)_n + nO_2$$

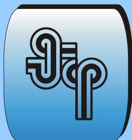


Кислород выходит из воды, но не из CO_2. Фотосинтез протекает непосредственно в зеленых частях растений – хлоропластах. Они входят в состав растительных клеток. Хлоропласты содержат вещество – хлорофилл.
Фотосинтез делится на две стадии: световую и темновую. Протекают они одновременно, но в разных частях хлоропласта. Реакции темновой фазы делятся на три основных типа и зависят от вида растений: С3-растения; С4-растения; САМ-растения.



Хлоропласт

https://kipmu.ru/fotosintez



Скорость фотосинтеза

Факторы, влияющие на фотосинтез:

Вода является основополагающим фактором, поэтому при ее **недостатке реакции замедляются**.
Наиболее благоприятны волны **красного и сине-фиолетового** спектра.
Также предпочтительнее **высокая степень освещенности** ***W***, но до определенного значения.
Высокая концентрация углекислого газа $[CO_2]_a$ обеспечивает быстрый фотосинтез и наоборот.
Определенная **температура** важна для ферментов, которые ускоряют реакции.
Идеальные условия– около **25 - 30°С**.
На скорость фотосинтеза влияет **устьичная проводимость** ***V***.
Скорость реакции ***r*** одинакова для всех зеленых растений.

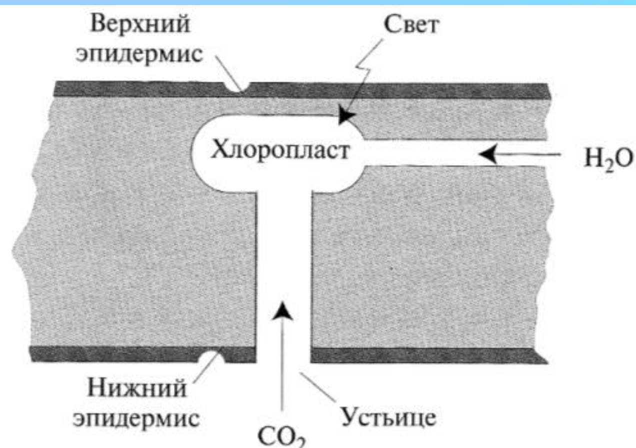
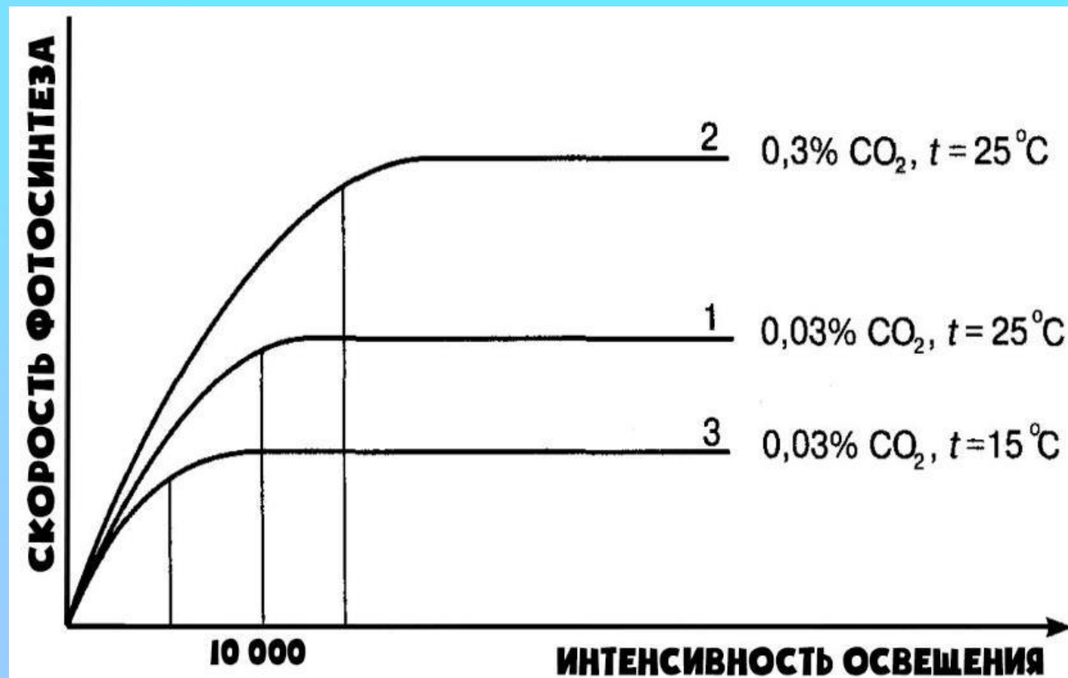


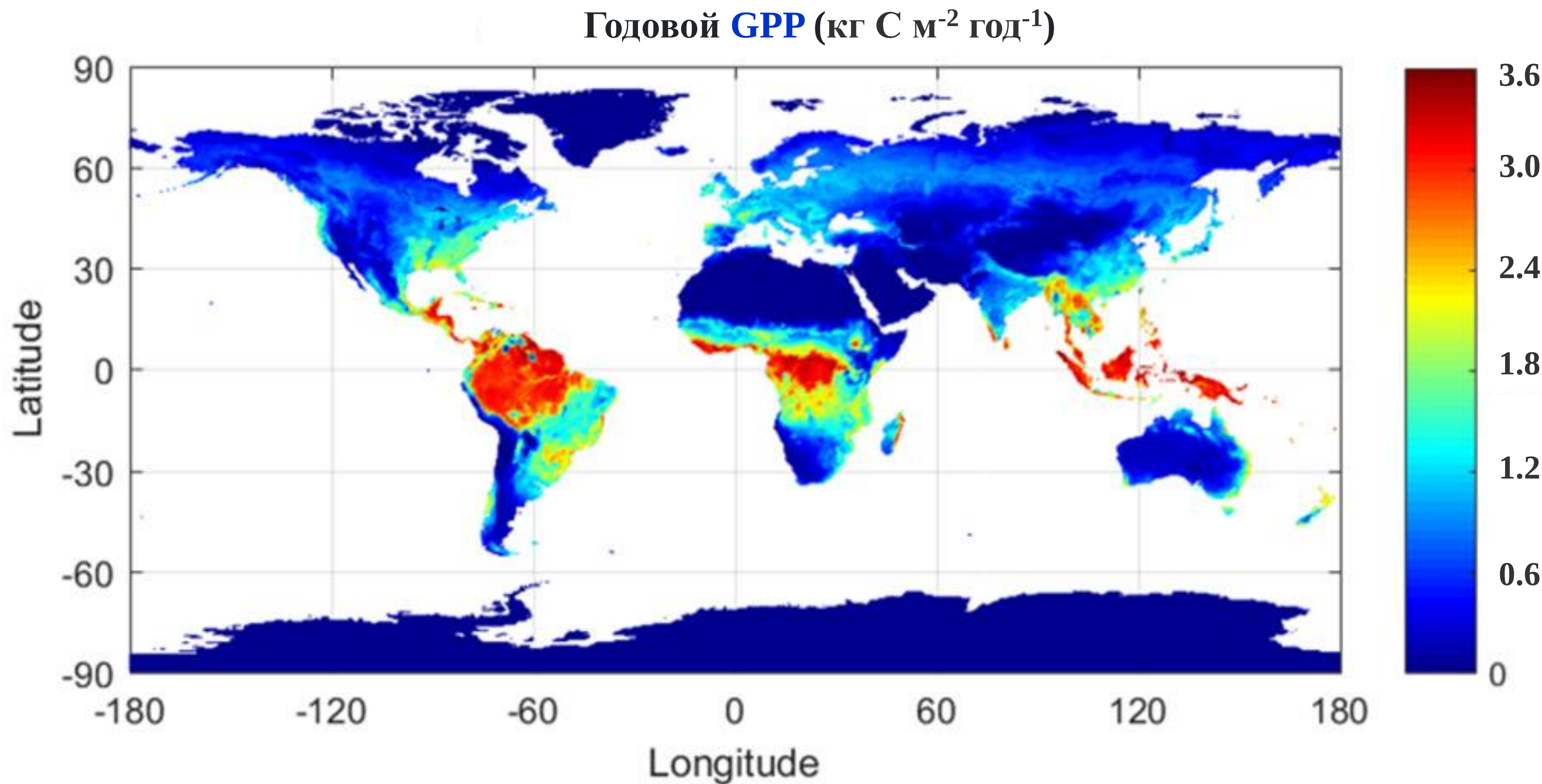
Схема фотосинтезирующей единицы зеленого листа. Скорость фотосинтеза:

$r\,[CO_2]_a W/(1 + Wr/V)$



да Роза // ВИЭ, 2010

Поглощение CO_2 за счет фотосинтеза



GPP - брутто-поглощение CO_2 за счет фотосинтеза в земной растительности (*Ryu, 2019*).

Интенсивность фотосинтеза максимальна в тропических лесах (≥ 3 кг С $м^{-2}$ $год^{-1}$) и уменьшается с увеличением широты со вторичным максимумом 1 - 1.2 кг С $м^{-2}$ в лесах умеренного пояса. Тропические леса Амазонки в некоторых случаях перешли от поглотителя углерода к его источнику.



Баланс потоков CO_2 в процессе фотосинтеза

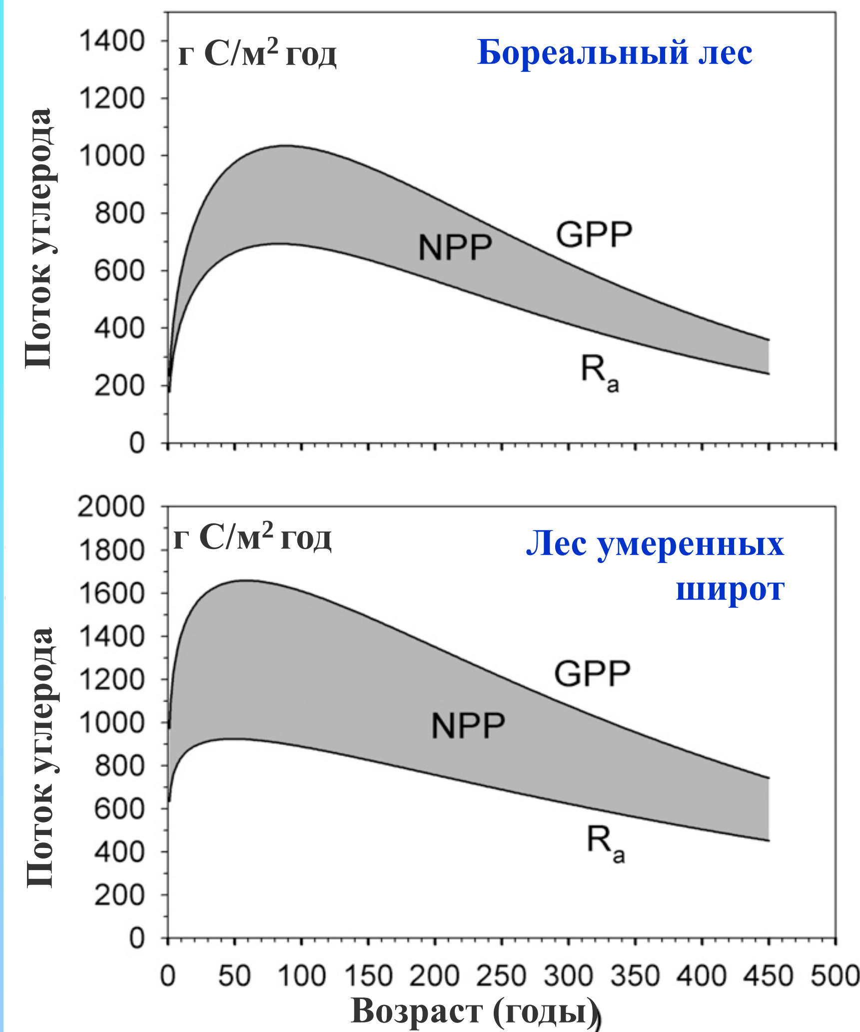
GPP (gross primary production): **брутто-поглощение** CO_2 **растениями при фотосинтезе.**

NPP (net primary production): **нетто-поглощение** CO_2 **растениями при фотосинтезе.**

R_a: **выделение** CO_2 **растениями за счет дыхания.**

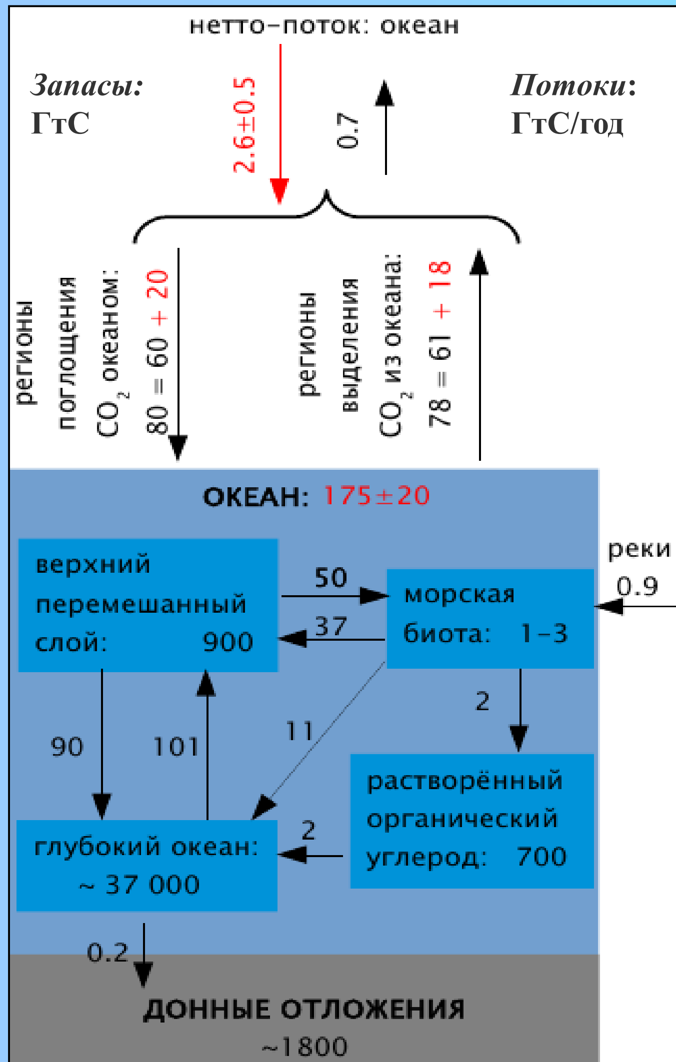
РФ: площадь лесов 815 млн. га (21% в мире).
Поглощение CO_2 **лесами в год: 319 млн. тонн С.**
Удельное поглощение CO_2 **в год: 48 г С/м²** (48 г $C/м^2$).
Молодая лиственница (Сахалин): 370 г С/м² (370 г $C/м^2$).

Поток углерода в зависимости от возраста леса
(Tang, Luyssaert et al. // PNAS, 2014)

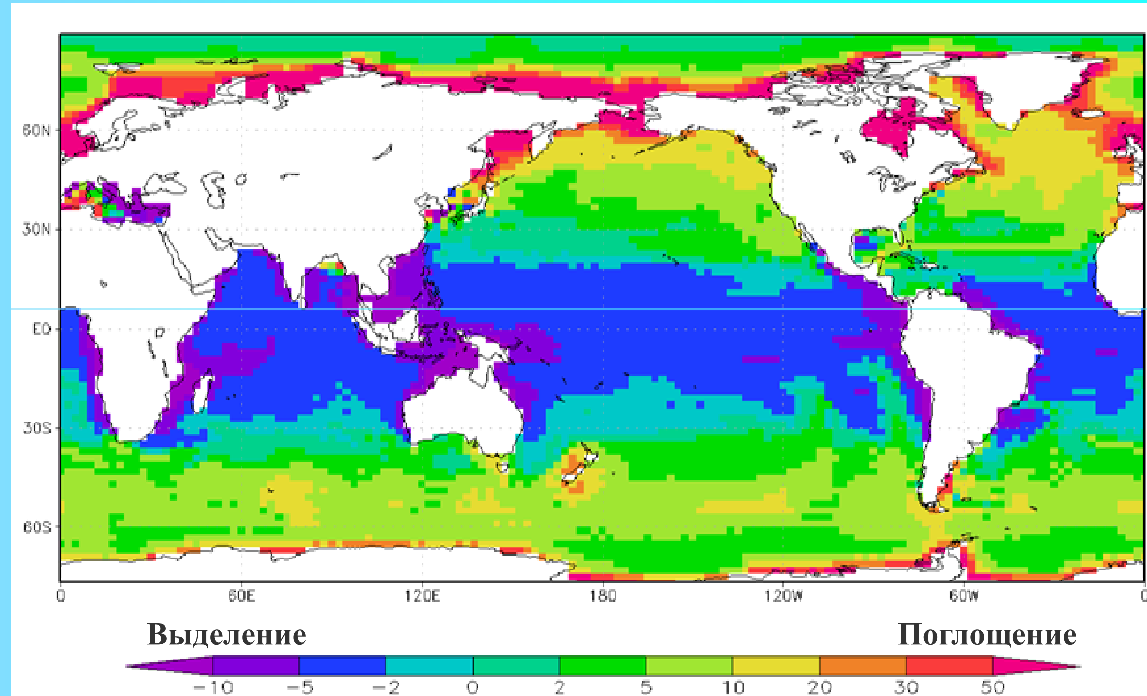




Процессы переноса CO_2 в океане



Елисеев //Фундаментальная и прикладная климатология, 2017



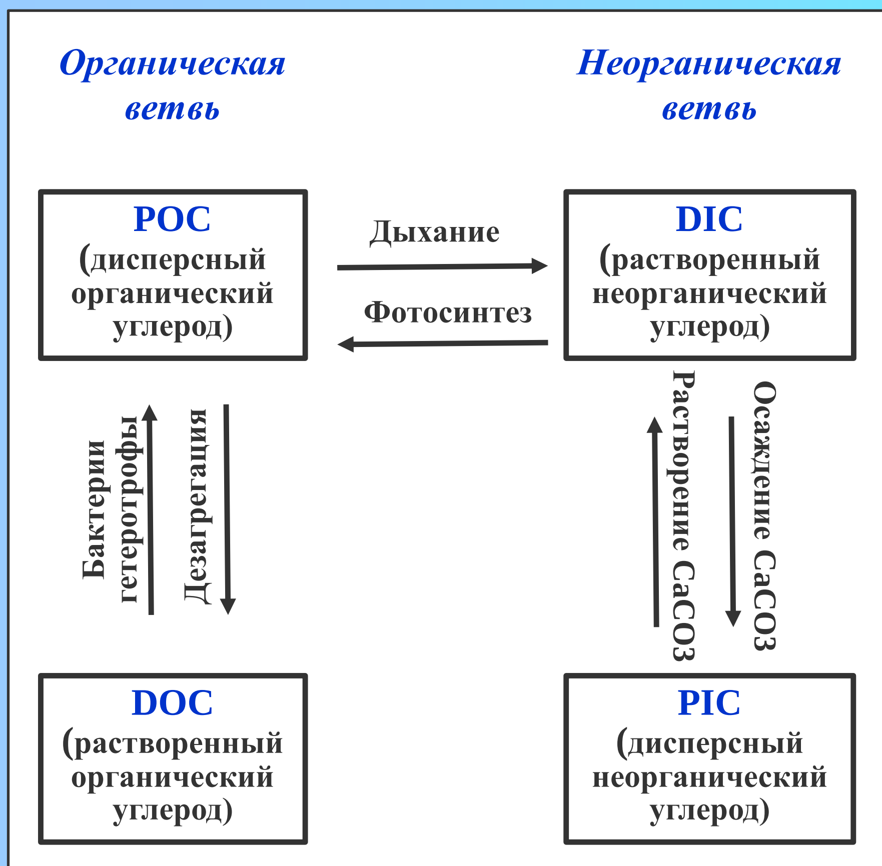
Потоки углерода в океане (среднее за 1991-2000 гг.), **г С м$^{-2}$ год$^{-1}$**.
Muryshev et al. // www.researchgate.net/publication/266485152

Океан - один из самых больших резервуаров углерода в земной системе с запасом **40 тыс. млрд. т углерода** (в **50 раз больше**, чем в **атмосфере**). Однако большая часть этого запаса находится в среднем и глубоком слоях океана с временем отклика порядка нескольких столетий или **тысячелетий**. Основную часть (**98%**) запаса углерода океана составляет растворённый **неорганический углерод**. Основная его масса находится в виде бикарбоната HCO_3^- (91%) и карбоната CO_3^{2-} (9%).



Процессы переноса CO_2 в океане

Принципиальная схема процессов обмена углерода в океане



Углерод разделяется на **четыре** отдельных резервуара в зависимости от того, является ли он органическим или неорганическим и растворен ли он или в твердых частицах.

Три основных процесса (или **насоса**), составляющих морской углеродный цикл, доставляют атмосферный углекислый газ во внутренние районы океана:
(1) насос **растворимости**,
(2) **карбонатный** насос,
(3) **биологический** насос.

(1) Насос растворимости включает в себя процессы **растворения** CO_2 в морской воде и перенос океанической **циркуляцией**. Поток углекислого газа (на единицу площади) из атмосферы в океан описывается **законом Генри** (*Siegenthaler, Sarmiento, 1993*):

$$f_o = k_{CO2}\ \alpha\ (pCO_{2,a} - pCO_{2,o}),$$

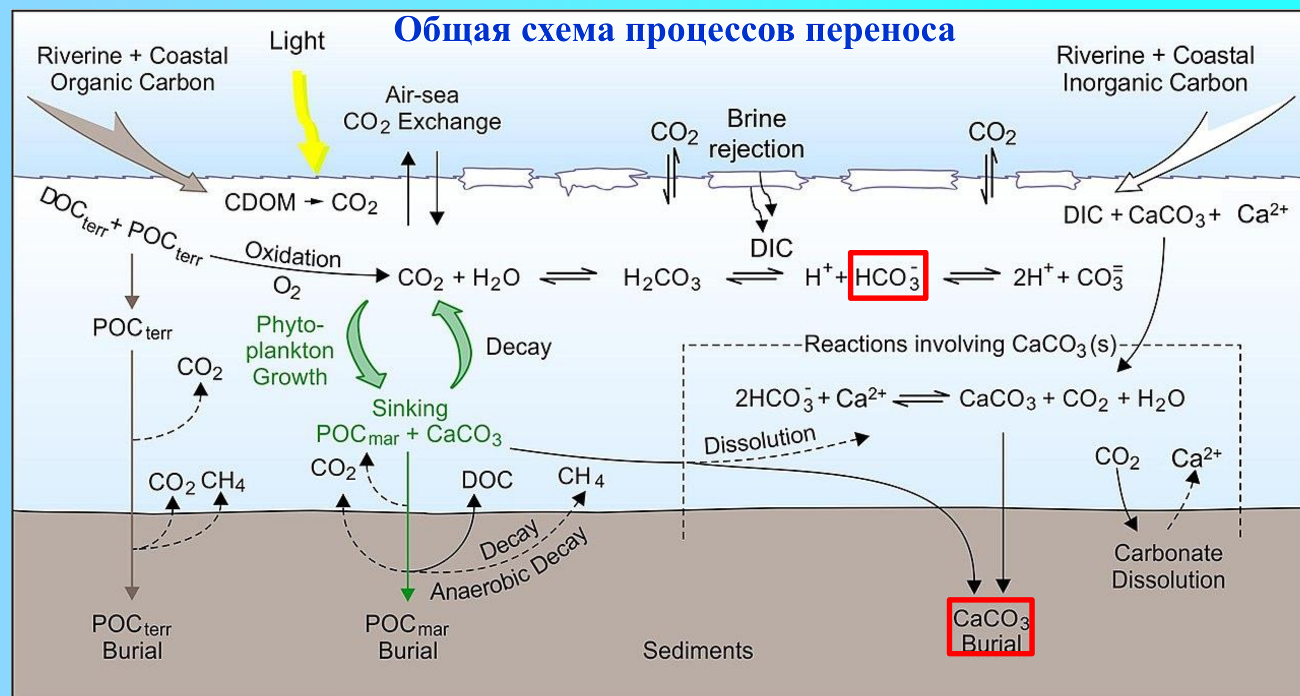
где k_{CO2} - коэффициент обмена, который зависит от скорости ветра в приземном слое и характеристик устойчивости этого слоя, α - растворимость CO_2 в морской воде, $pCO_{2,a}$ и $pCO_{2,o}$ - парциальное давление CO_2 в воздухе и в воде соответственно. Накопление CO_2 в атмосфере приводит к поглощению его океаном, а уменьшение концентрации CO_2 - к выделению углекислого газа из океана. Растворимость CO_2 в морской воде уменьшается при увеличении **температуры** (*Weiss et al., 1982*).



Процессы переноса CO_2 в океане

(3) Биологический насос представляет собой биологически обусловленное поглощение углерода океаном из атмосферы и наземного стока во внутренние районы океана и донные отложения. Это часть океанического углеродного цикла, ответственная за круговорот органического вещества, образующегося в основном **фитопланктоном** во время **фотосинтеза.** Примерно **60 млрд. т** углерода фиксируется морским **фитопланктоном** каждый год, несмотря на то, что они составляют менее **1% от общей фотосинтетической биомассы на Земле**. Насос ежегодно переносит в недра океана около **11 млрд. тонн углерода**.

Общая схема процессов переноса



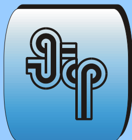
Capelle et al., 2020

(2) Карбонатный насос иногда называют компонентом “твердых тканей” биологического насоса. Некоторые поверхностные морские организмы, такие как **кокколитофоры**, производят твердые структуры из карбоната кальция, путем фиксации **бикарбоната**. Эта фиксация является важной частью океанического углеродного цикла:

$$Ca^{2+} + 2\,HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$$

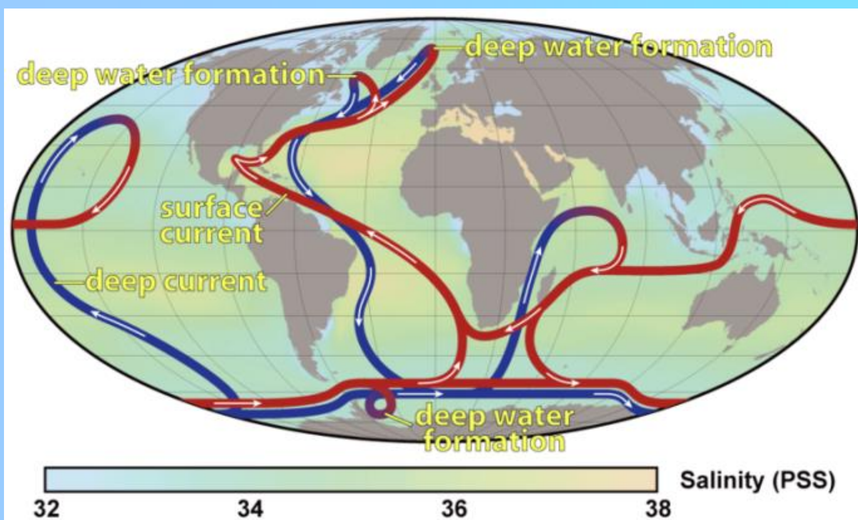
Кокколитофоры





Океанические течения

Океанические течения играют огромную роль в формировании климата, перенося на дальние расстояния теплые и холодные массы воды, а также растворенный CO_2. Наиболее важные факторы: ветер (**пассаты**), силы **Кориолиса** и **термохалинная циркуляция** — циркуляция, создаваемая за счет перепада плотности воды, образовавшегося вследствие неоднородности распределения **температуры** и **солёности** в океане. Ветровые поверхностные течения (такие как **Гольфстрим**) перемещают воды из экваториальной части Атлантического океана к северу. Эти воды попутно охлаждаются и в итоге за счёт увеличившейся плотности погружаются ко дну (формируя **Северо-Атлантическую глубинную водную массу**). Плотные воды на глубинах перемещаются в сторону, противоположную направлению движения ветровых течений. Изменения в структуре течений, например, замедление или остановка **Гольфстрима** за счет повышения температуры может привести к радикальным изменениям климата на региональном уровне и даже глобально.
Яркий пример - явление **Эль-Ниньо**.



Термохалинная циркуляция

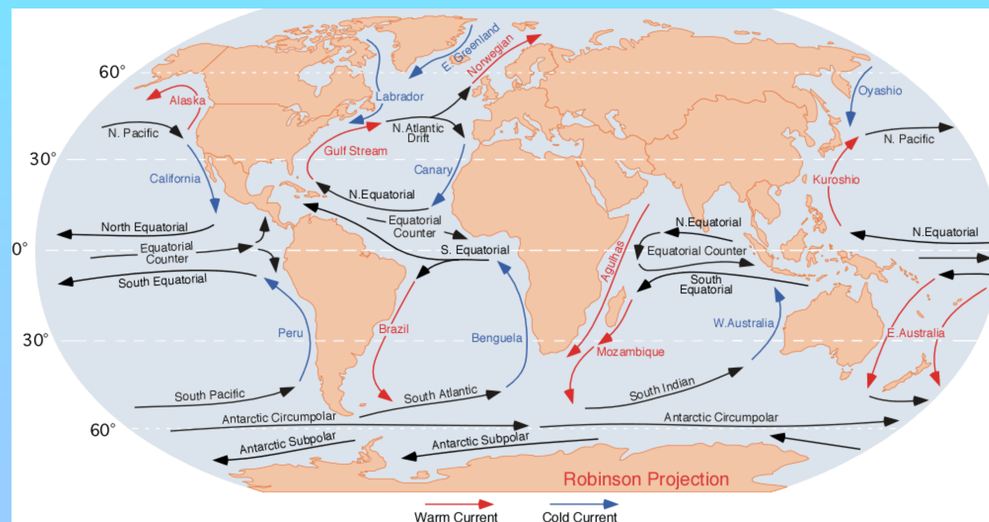


Схема течений в Мировом океане

Океанические течения

Эль-Ниньо и Ла-Нинья

Эль-Ниньо (малыш), или Южная осцилляция - колебание температуры поверхностного слоя воды в экваториальной части Тихого океана, в которой область нагретых приповерхностных вод смещается к востоку. При этом ослабевают или прекращаются пассаты, замедляется апвеллинг в восточной части Тихого океана, у берегов Перу. Противоположная фаза осцилляции называется Ла-Нинья (малышка).
Характерное время осцилляции - от 3 до 8 лет.
Эль-Ниньо 1997 - 1998 годов было настолько сильным, что распространились теории о связи Южной осцилляции с глобальными изменениями климата.

Явление Эль-Ниньо

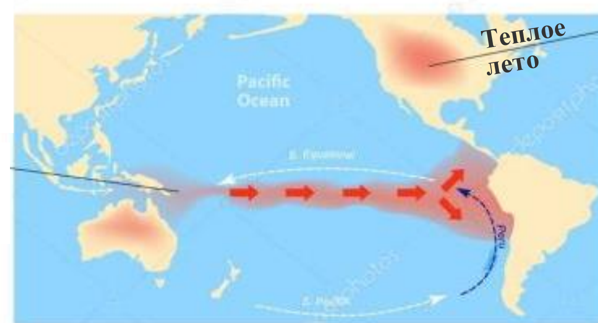
Норма

Теплая вода



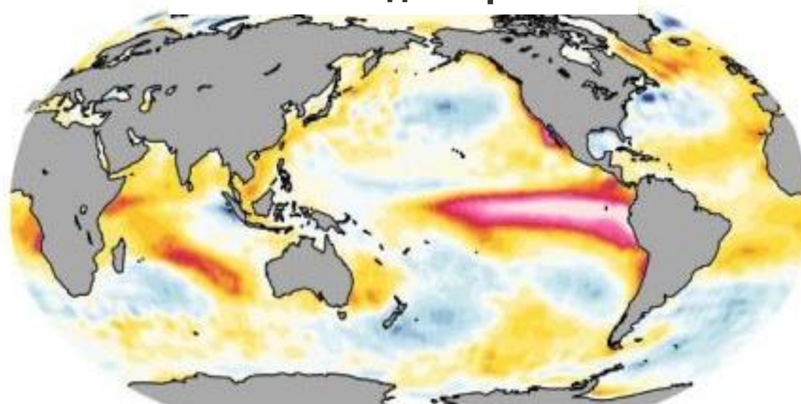
Год Эль-Ниньо

Поворот теплого течения

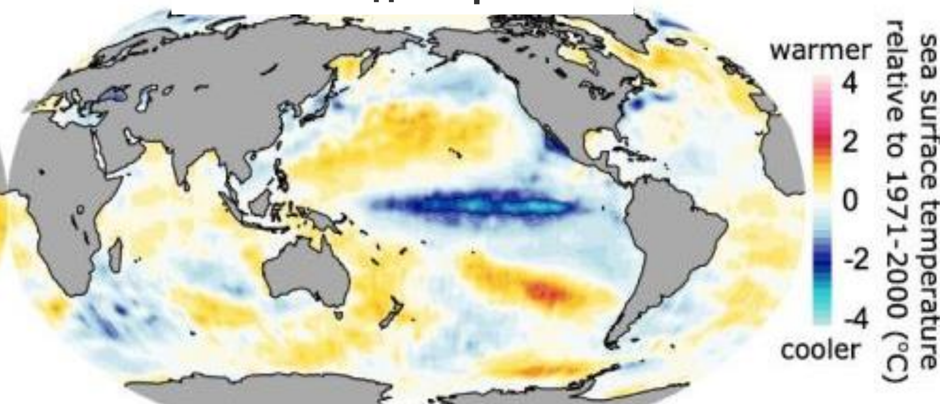


Поля температур

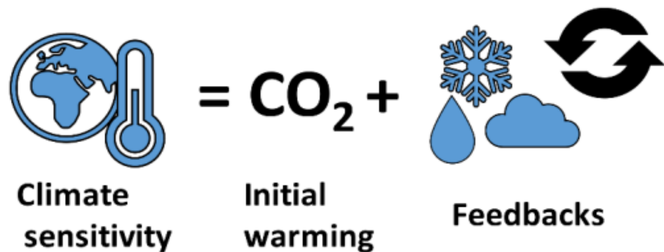
Эль-Ниньо: декабрь 1997



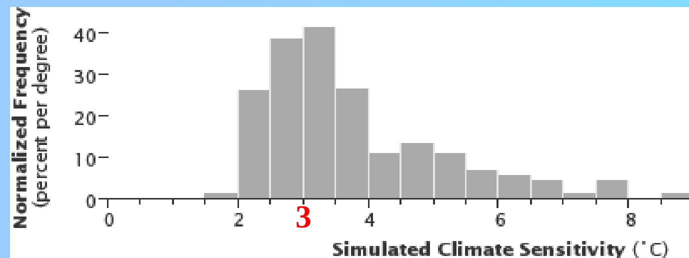
Ла-Нинья: декабрь 1988



Обратные связи



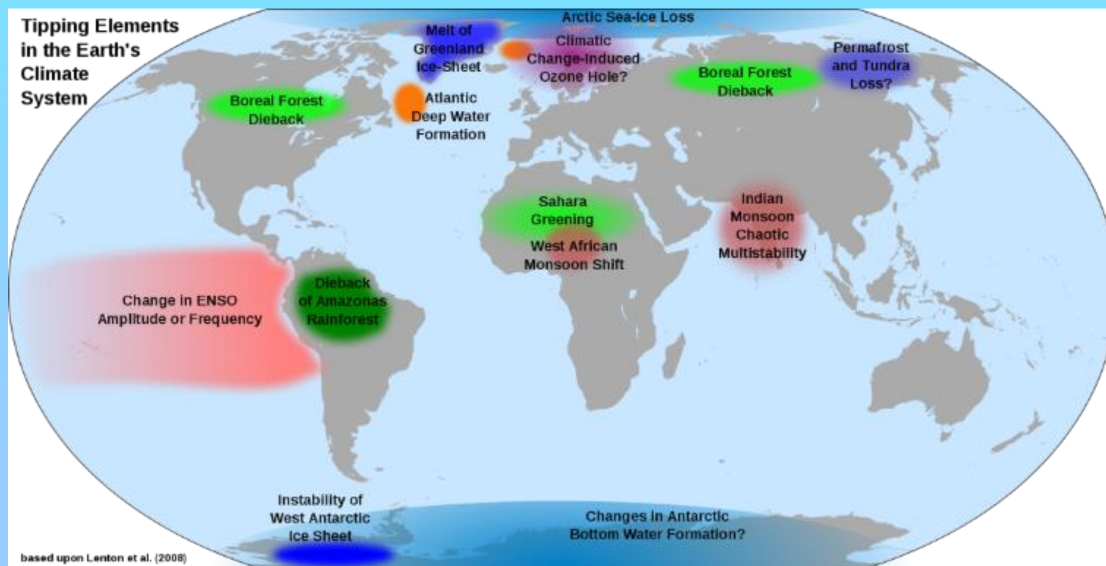
Равновесная чувствительность климата – рост температуры нижних слоёв атмосферы при удвоении концентрации CO_2. За счет эффекта обратных положительных связей роль CO_2 намного больше, чем в случае только его учета в парниковом эффекте (вклад 20%).

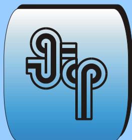


Частотное распределение равновесной чувствительности климата на основе моделирования удвоения CO_2. Вероятность большого или очень большого повышения температуры будет больше, чем вероятность небольшого повышения.

Tipping points - критические факторы изменения климата - элементы климатической системы, изменения в которых могут существенно повлиять на климат Земли в целом (иначе - переломные моменты). В теории динамических систем хорошо известны критические явления, когда небольшие пороговые изменения отдельных параметров системы могут приводить к её переходу в качественно другое состояние. Например, бифуркация или воздействие шума.

Насчитано около 15 значимых переломных моментов в климатической системе планеты. Наименее устойчивыми к глобальному потеплению и наиболее близкими к точке невозврата являются коралловые рифы, ледяные щиты Западной Антарктики и Гренландии, леса Амазонки. Другие примеры - Эль-Ниньо, Гольфстрим.





Обратная связь между климатом и углеродным циклом

Два типа взаимодействия: (1) **прямое** воздействие изменения концентрации CO_2 в атмосфере на углеродный цикл (эффект фертилизации растений углекислым газом атмосферы и изменение множителя в законе Генри для поверхности океана); (2) **косвенное** воздействие изменения $[CO_2]_a$ на углеродный цикл, связанное с изменениями климата при развитии соответствующего **парникового** возмущающего воздействия. В англоязычной литературе они получили названия "carbon-concentration feedback" и "carbon-climate feedback" соответственно.

В **линейном** приближении потоки CO_2 из атмосферы на сушу и в океан за конечный промежуток времени можно представить в виде (*Friedlingstein et al., 2003*):

Суша: $G_L = \beta_L \, \Delta[CO_2]_a + \gamma_L \Delta T_g$
Океан: $G_O = \beta_O \, \Delta[CO_2]_a + \gamma_O \Delta T_g$
Суммарно: $G = G_L + G_O = \beta \, \Delta[CO_2]_a + \gamma \, \Delta T_g$

$\beta = \beta_L + \beta_O$
$\gamma = \gamma_L + \gamma_O$

В проекте **C4 MIP** (Coupled Climate-Carbon Cycle Models Intercomparison Project) (*Friedlingstein et al., 2006*) было проведено сравнение характеристик **обратной связи** между климатом и углеродным циклом. Показано, что β_L и β_O **положительны** - эффекты группы (1) усиливают поглощение CO_2 из атмосферы при увеличении $[CO_2]_a$. В свою очередь, γ_L и γ_O **отрицательны**, что соответствует положительной обратной связи. Для большинства моделей $|\gamma_L| >> |\gamma_O|$, так что обратная связь между климатом и углеродным циклом определяется, в основном, **наземными** экосистемами.

Устойчивость земной системы.

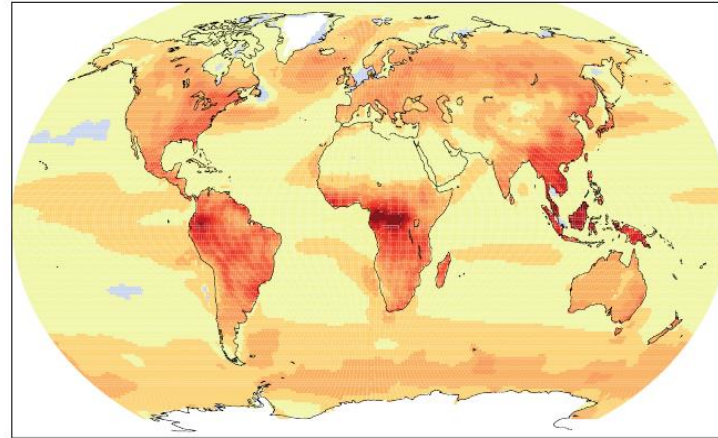
Несмотря на положительную обратную связь между климатом и углеродным циклом, **противоположные** относительно друг друга знаки γ и β способствуют устойчивости глобальной земной системы при внешних эмиссиях углекислого газа в атмосферу. Если CO_2 выбрасывается в течение некоторого времени, а затем эта эмиссия становится равной нулю, то после достаточно длительного интервала времени земная система, как ожидается, должна прийти в состояние **нового равновесия**.

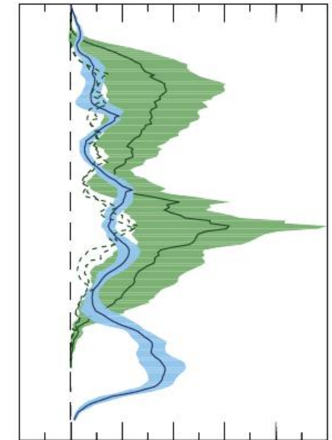
Обратная связь между климатом и углеродным циклом

Поток CO_2
из атмосферы на сушу и в океан:
$\beta\ \Delta[CO_2]_a + \gamma\ \Delta T_g$

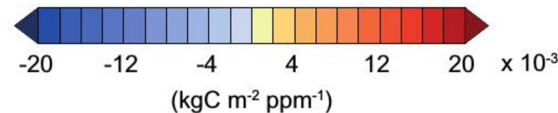
Пространственное распределение средних по ансамблю моделей значений $\beta = \beta_L + \beta_O$ и $\gamma = \gamma_L + \gamma_O$ в численном эксперименте с увеличением $[CO_2]_a$ на 1%/год вплоть до четырёхкратного увеличения относительно доиндустриального значения.
В ансамбль включены модели BCC–CSM1, CanESM2, CESM1–BGC, HadGEM2–ES, IPSL–CM5A-LR, MPI–ESM–LR и NorESM1-ME.
(Climate Change 2013, рис. 6.22)

a. Regional carbon-concentration feedback $\beta = \beta_L + \beta_O$



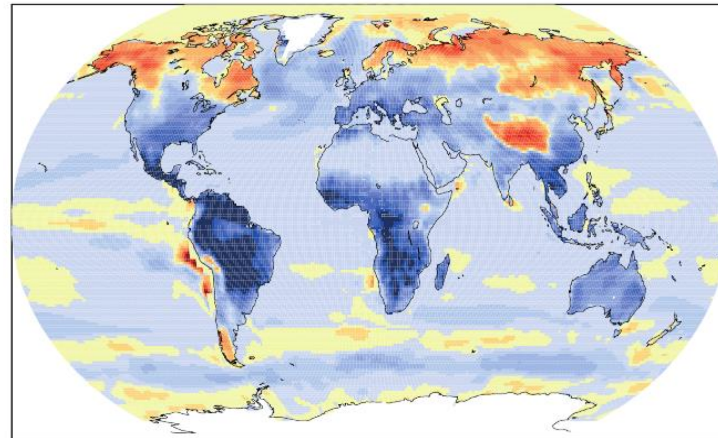


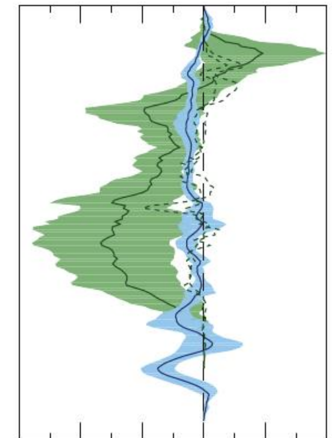
0 0.10 0.20
(10^6 kgC m^{-1} ppm^{-1})



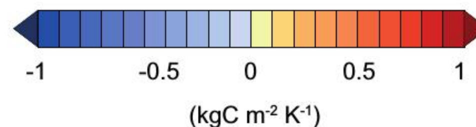
Land
Ocean

b. Regional carbon-climate feedback $\gamma = \gamma_L + \gamma_O$



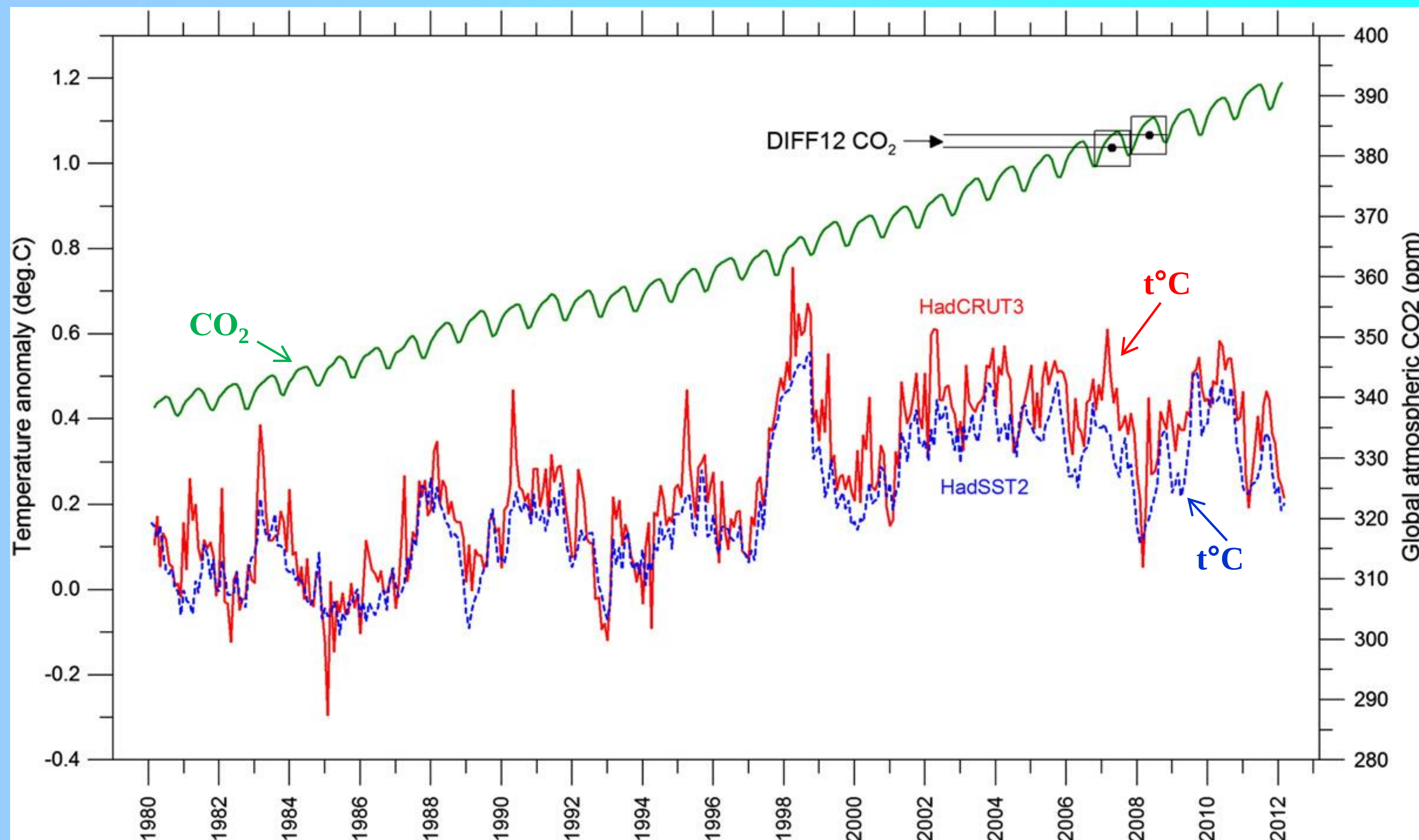


-10 0 10
(10^6 kgC m^{-1} K^{-1})



Елисеев //Фундаментальная и прикладная климатология, 2017

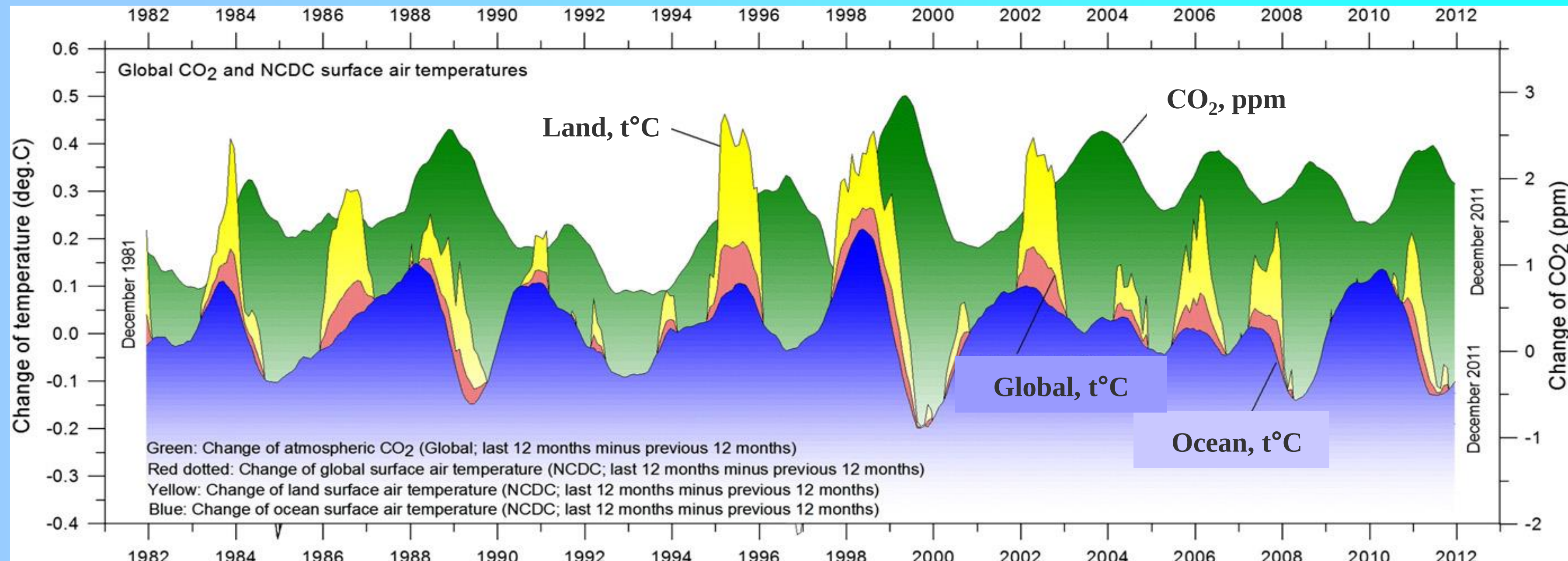
Корреляции: температура – концентрация CO_2

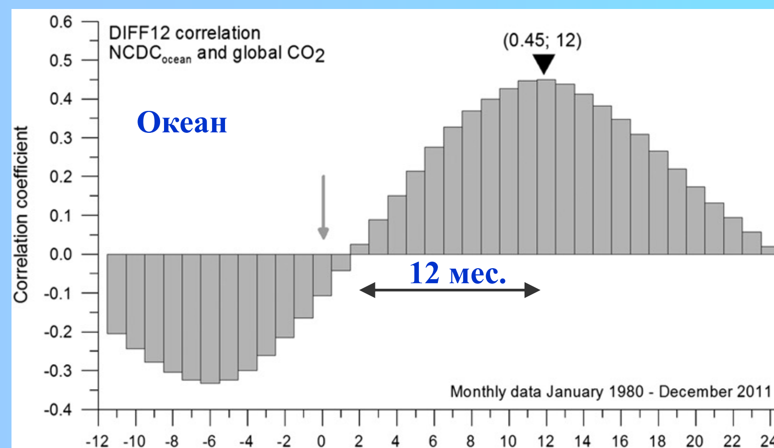


Monthly global atmospheric CO_2 (NOOA; green), monthly global sea surface temperature (HadSST2; blue) and monthly global surface air temperature (HadCRUT3; red).

Humlum et al. // Global and Planetary Change, 2013

Корреляции: температура – концентрация CO_2





Humlum et al. // Global and Planetary Change, 2013

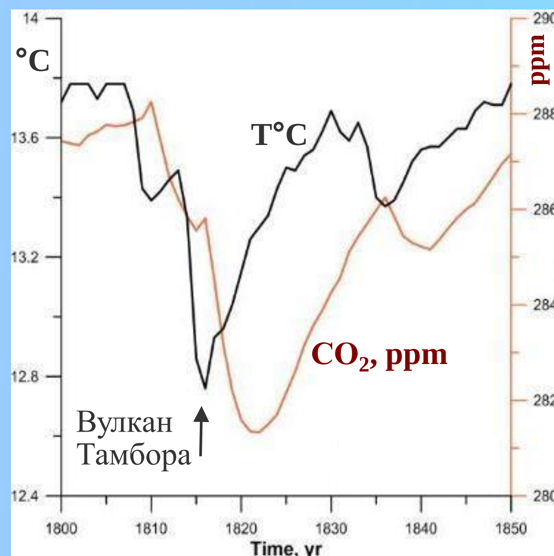
Коэффициенты корреляции между **температурами** приземного воздуха (a: суша; b: океан; c: глобальный) и глобальным атмосферным CO_2 для различных месячных **интервалов** CO_2. Так, для **океана** максимальная положительная корреляция обнаружена для CO_2, **отстающего** на **12** месяцев от температуры воздуха. Цифры в скобках показывают максимальный коэффициент корреляции и временной лаг CO_2 в месяцах.

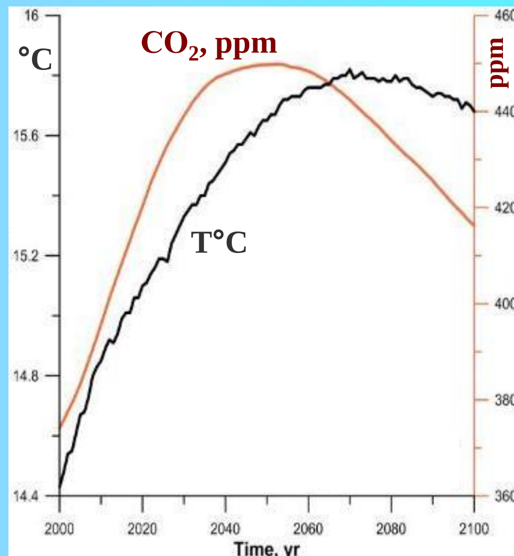
Выводы этой и ряда других работ:

Изменения температуры приводят к изменению концентрации CO_2, а не наоборот!



Временной лаг между изменениями глобальной температуры и содержанием CO_2 в атмосфере





Изменения температуры T и [CO_2] в моделировании с использованием RCP 2.6 и климатической модели ИФА РАН

Период	MIROC-ESM	КМ ИФА РАН
1800 - 1849	8	4
2006 - 2100	-15	-8

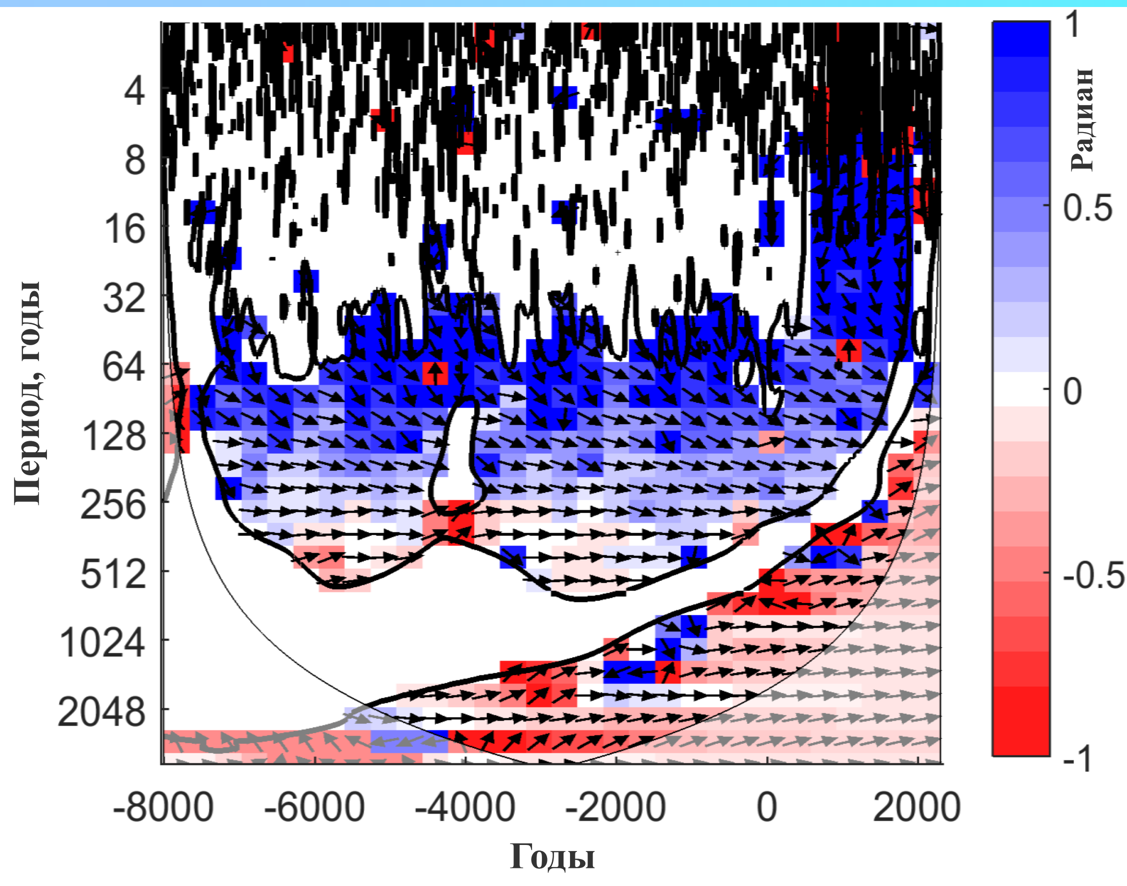
Временные лаги $\Delta\tau$ (годы) между изменениями глобальной температуры T и содержанием CO_2 в атмосфере [CO_2], полученными при моделировании с помощью MIROC-ESM и КМ ИФА РАН .
Если $\Delta\tau > 0$: T опережает [CO_2].
Если $\Delta\tau < 0$: [CO_2] опережает T.

Когда антропогенные выбросы CO_2 в атмосферу невелики, изменения в T в основном обусловлены вулканической активностью или вариациями солнечной радиации. Изменения [CO_2] задерживаются относительно изменений T на несколько лет. Например, в 1815 году произошло извержение вулкана Тамбора, которое было самым сильным за последние несколько столетий. При моделировании с КМ ИФА РАН реакция на это заключалась в снижении T в течение следующих нескольких лет на 1 К. Показано, что при внешнем воздействии в виде выбросов CO_2 в атмосферу временной лаг $\Delta\tau$ между изменениями [CO_2] и T пропорционален значению равновесной чувствительности модели к атмосферному CO_2 (рост температуры при удвоении [CO_2] равен 2,2 К в модели ИФА РАН) и меняет знак!

Muryshev et al. // Proc. SPIE, 2019



Временной лаг между изменениями глобальной температуры и содержанием CO_2 в атмосфере



Квадратичная вейвлет-когерентность между температурой T и концентрацией CO_2, полученная при моделировании голоцена с помощью КМ ИФА РАН . Уровень значимости 5% на фоне красного шума показан в виде толстого контура. Относительное соотношение фаз показано в виде стрелок (в фазе - вправо, противофазе - влево, и T, опережающая [CO_2] на π/2, - стрелка прямо вниз). Цветная полоса справа указывает значение сдвига фазы между T и CO_2 в радианах (синий - T, опережающая [CO_2], красный - [CO_2], опережающая T).

Показано, что лаг между изменениями переменных, определяемый методами корреляционного и регрессионного анализа, не характеризует причинно-следственные связи между ними в общем случае.

Muryshev et al. // Proc. SPIE, 2019

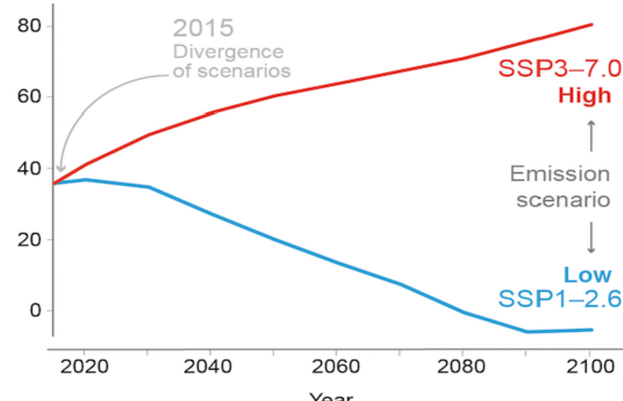


Резюме: Мир

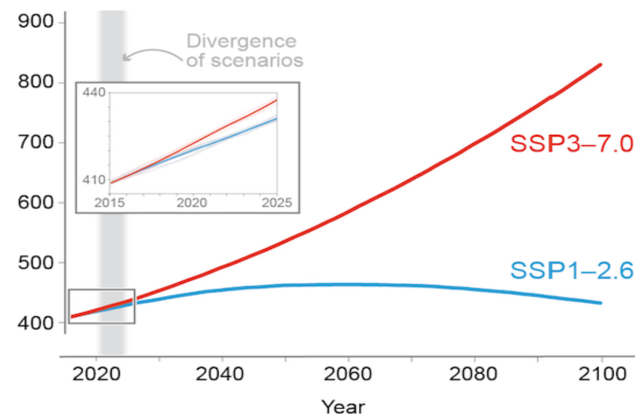
Демонстрация выгоды от сокращения эмиссии CO_2

2 сценария выбросов CO_2 и их влияния на глобальную температуру поверхности Земли: сценарий с низким уровнем выбросов (**SSP1-2.6, синий**) и сценарий с высоким уровнем выбросов (**SSP3-7.0, красный**).
В сценарии с низким уровнем выбросов выбросы CO_2 начинают снижаться в 2020 году до нуля к концу века, в то время как в сценарии с высоким уровнем выбросов они продолжают увеличиваться на протяжении всего 21 века. Толстые линии - это среднее значение десяти отдельных симуляций (тонкая линия) для каждого сценария.
Различия между отдельными моделями отражают естественную изменчивость.
Различия для 2 сценариев начинает проявляться через **5 – 10 лет** для концентрации **CO_2** в атмосфере и через **20 – 30 лет** для **температуры** Земли. Если произойдет крупное извержение **вулкана** (что ожидается в ближайшие 100 лет), то возникнут сильные возмущения хода **температуры**, что еще более затруднит анализ климатических изменений.

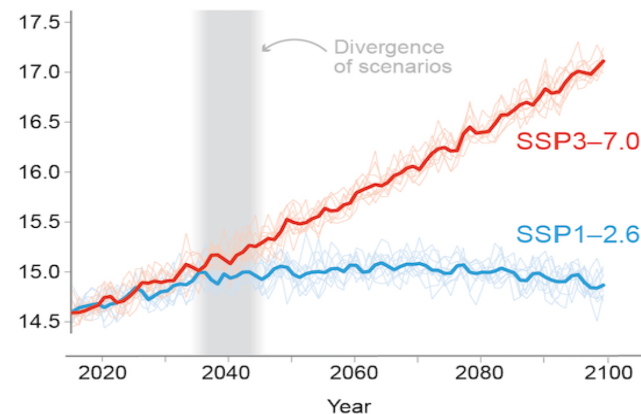
Выбросы CO_2 (Гт CO_2 /год)



Концентрация CO_2 в атмосфере (ppm)



Глобальная температура поверхности (t°C)



МГЭИК



Резюме: Россия

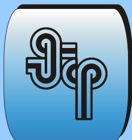
2020 г.	CO_2 млн. т	Население млн.	CO_2/чел т/чел	Доля
China	9 894	1 471	6.7	30.9%
US	4 432	331	13.4	13.9%
EU	2 858	513	5.6	8.9%
India	2 298	1 380	1.7	7.2%
Russia	1 432	146	9.8	4.5%
Japan	1 027	126	8.1	3.2%
World	31 984	7 795	4.1	100.0%

В России потепление идет с существенно более высокой скоростью 2°C/40 лет, а в мире 0,8°C/40 лет, то есть в 2,5 раз быстрее!

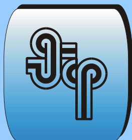


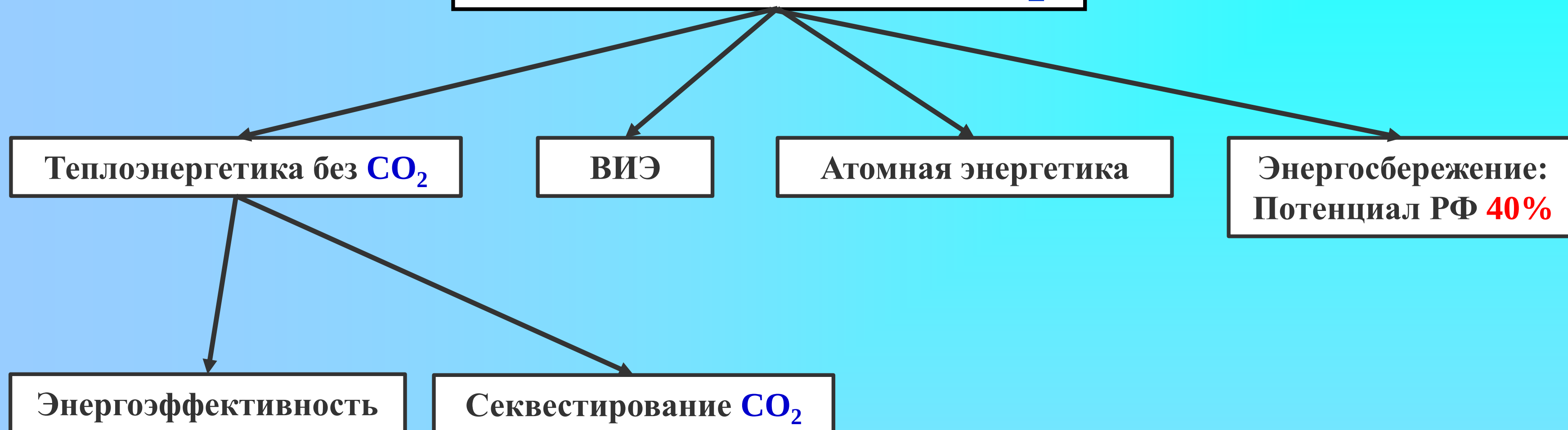
Выбросы ПГ в мире

В 2017 году эмиссия парниковых газов в стране без учета абсорбирующего эффекта лесов составляла 67,6 % уровня 1990 года, а с учетом абсорбирующего эффекта лесов - 50,7%.
«Энергетическая стратегия РФ до 2035 г.»

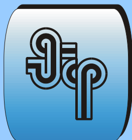


Энергетические технологии, удовлетворяющие требованиям сокращения выбросов CO_2





	Выбросы парниковых газов, т CO_2 –экв./ГВт·ч	Относительные выбросы
Уголь	820	1.00
Газ	490	0.60
ФЭУ	48	0.06
АЭС	12	0.015
ВЭС	11	0.013

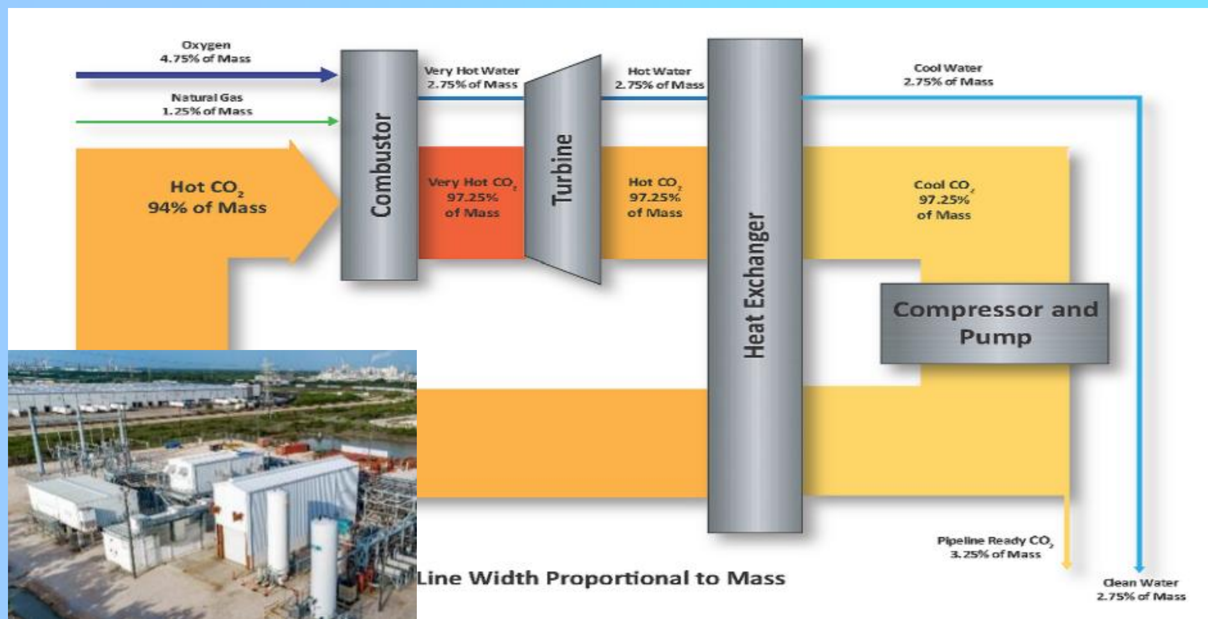


Цикл Аллама на природном газе

Сжигание природного газа в O_2: $CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$
Нет выбросов CO_2 в атмосферу!
Теплоноситель – сверхкритический CO_2.
Параметры цикла: 1150°C, 300 атм.
КПД нетто 59%.
Нормированная себестоимость составит 6 цент/кВт ч !
Пилотный стенд на газе 50 МВт (т) в Хьюстоне (2018 г.).
Создана турбина на сверхкритическом CO_2 (Тошиба).
Коммерческий проект на газе 300 МВт (э).
Разработчик: NET Power. Заказы на 2 ТЭС по 280 МВт (э).
Если потребовать секвестирование CO_2 для ПГУ, то их КПД упадет до 40 - 50% вместо 50 - 60%.



Родни Аллам (Великобритания) – лауреат Нобелевской премии.



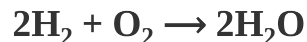
Цикл ОИВТ на природном газе с бескомпрессорной парогазовой установкой – *аналог.*

КНТП «Энергетика больших мощностей нового поколения»: *Проект 4.* Создание опытно-промышленного кислородно-топливного энергетического комплекса с нулевыми выбросами на сверхкритическом диоксиде углерода.



Водородная энергетика (экономика)

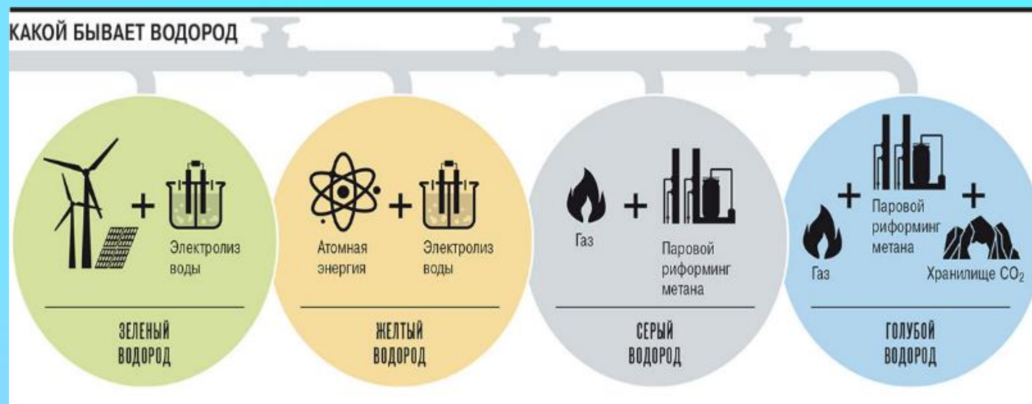
Водород - вторичный энергоноситель. Водород - наиболее емкий и экологически чистый энергоноситель из всех существующих химических веществ. Единственным продуктом реакции является вода:



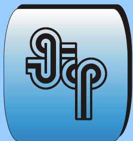
$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$

Теплота сгорания водорода в 2,5 раза выше, чем у природного газа. Водород может использоваться: в процессах эффективного сжигания; для прямого преобразования энергии в топливных элементах с высоким КПД; как сырье для многих химических продуктов. Среди главных проблем - безопасность.

Самый эффективный способ получения H_2 - метод паровой конверсии природного газа. Однако, в будущем предполагается, что основным источником водорода будет электролиз воды в атомной (или возобновляемой) энергетике. Возможно использовать газификацию угля. В последнем случае имеется в виду, что вначале путем газификации угля будет получаться синтез-газ (смесь H_2 и CO), а из него уже извлекается водород. Приведенные затраты на производство:
«серого» водорода - €1,24 за 1 кг, а «зеленого» - в €3,43 за 1 кг.



Исходя из свойств водорода, его использование в энергетике сомнительно.
Муравьиная кислота HCOOH и аммиак NH_3 рассматриваются как наиболее перспективные химические носители водорода.



Заключение

ВЫВОДЫ:

- При любых реальных сценариях развития энергетики глобальное потепление продолжится и уровень в 1,5°С будет достигнут в середине столетия, но далее прогнозы расходятся, и результат может зависеть от действий человеческого сообщества.
- Парижское соглашение не может быть реализовано в полной мере, но глобальная декарбонизация энергетики неизбежна.
- В России потепление климата идет более высокими темпами (в 2,5 раз быстрее) и ведет к значительному сокращению потребности в топливе (до 15%), в основном из-за снижения расходов на теплоснабжение.

РЕКОМЕНДАЦИИ:

- Последовательно осуществлять декарбонизацию энергетики со скоростями, не превосходящими экономические возможности страны.
- Сосредоточить усилия на повышении интенсивности биосферного стока (лесоразведение, борьба с лесными пожарами и др.).
- Дальнейшее развитие климатических моделей Земли с использованием бенчмаркинга.
- Организация систем климатического мониторинга.
- В силу неизбежности изменений климата разрабатывать адекватные меры по адаптации человеческого общества к существованию в новых условиях.





Спасибо за внимание!